



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
SCIENCES ET TECHNOLOGIES
ECOLE DOCTORALE PHYSIQUES ET APPLICATIONS



IAEA
International Atomic Energy Agency
Atoms For Peace

EAD : Physique Nucléaire et Physique des Hautes Energies
Laboratoire de Physique Nucléaire et Physique de l'Environnement

THÈSE

pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Nucléaire Appliquée et Physique des Hautes Energies
sur :

**PROTOTYPAGE D'UN ROBOT-VEHICULE CONTROLÉ PAR UNE
LIAISON RADIO FRÉQUENCE POUR SCANNER UNE SURFACE
RADIOACTIVE CONTAMINÉE**

présentée par

RATONGASOANDRAZANA Jean Baptiste

devant la commission d'examen composée de :

RABOANARY Roland	Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Président du jury
RASOLOMANANA Eddy Harilala	Professeur Titulaire à l'ESPA, Université d'Antananarivo	Rapporteur externe
RAJAOBELISON Joël	Professeur d'ESR à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Rapporteur interne
RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noël	Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Examineur
RABESIRANANA Naivo	Docteur HDR à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Examineur
RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA	Professeur Titulaire de Classe Exceptionnelle à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Examineur
RAMBOLAMANANA Gérard	Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Directeur de thèse

Soutenue le 20 Octobre 2017



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
SCIENCES ET TECHNOLOGIES
ECOLE DOCTORALE PHYSIQUES ET APPLICATIONS



EAD : Physique Nucléaire et Physique des Hautes Energies
Laboratoire de Physique Nucléaire et Physique de l'Environnement

THÈSE

pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Nucléaire Appliquée et Physique des Hautes Energies
sur :

**PROTOTYPAGE D'UN ROBOT-VEHICULE CONTROLÉ PAR UNE
LIAISON RADIO FRÉQUENCE POUR SCANNER UNE SURFACE
RADIOACTIVE CONTAMINÉE**

présentée par

RATONGASOANDRAZANA Jean Baptiste



devant la commission d'examen composée de :

RABOANARY Roland	Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Président du jury
RASOLOMANANA Eddy Harilala	Professeur Titulaire à l'ESPA, Université d'Antananarivo	Rapporteur externe
RAJAOBELISON Joël	Professeur d'ESR à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Rapporteur interne
RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noël	Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Examineur
RABESIRANANA Naivo	Docteur HDR à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Examineur
RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA	Professeur Titulaire de Classe Exceptionnelle à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Examineur
RAMBOLAMANANA Gérard	Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Directeur de thèse

Soutenue le 20 Octobre 2017

DEDICACE

*A la mémoire de mes chers biens
aimés parents, ma femme, mes frères, mes
sœurs et ma famille, pour la patience et le
dévouement dont ils font toujours fait
preuve...*

RÉSUMÉ

Titre :

Prototypage d'un Robot Véhicule contrôlé par une liaison Radio Fréquence pour scanner une surface radioactive contaminée

Résumé :

Les rayonnements ionisants ne sont pas perceptibles directement par les organes de sens de l'homme. En effet, les travaux d'intervention et de manipulation des sources de ces rayonnements ionisants présentent des risques d'accident très grave et souvent irréversibles pour l'organisme humain. Les travaux d'expérimentation et de maintenance dans de telle zone présentent aussi des risques nécessitant un minimum de précaution. Ainsi, le but de ce travail est de concevoir et de mettre au point un prototype d'un robot mobile de type véhicule télécommandé muni des détecteurs de sources de rayonnements ionisants Alpha, Bêta et Gamma pour surveiller à distance le taux de radioactivité d'une zone contaminée. Développé autour d'un **AVR-RISC** microcontrôleur Flash 08-bits **ATmega128**, l'électronique du système utilise des composants commerciaux d'actualité existants et à prix modérés. Une caméra de surveillance incorporée, couplée avec un transmetteur vidéo, permet de mieux diriger le Robot vers un endroit précis à atteindre. Ce Robot détecte, mesure et évalue automatiquement les doses des rayonnements captées en un endroit bien déterminé de son environnement avec une sensibilité au rayonnement Gamma pour une source de ^{60}Co de 58 cps/mR/hr et un bruit de fond minimal de 01impulsion par seconde. Les informations de navigation et les données collectées sont transmises vers le centre de commande par des ondes hertziennes.

Mots-clés :

ATmega128, détecteurs Geiger Müller, Robotique, microcontrôleur, radioactivité

ABSTRACT

Title:

Prototyping of Radio Frequency controlled Robot Vehicle to scan radioactive contaminated areas

Abstract:

The ionizing radiations are not directly audible by the organs of sense of the human being. Maintenance and handling of sources of such ionizing radiations present some risks of very serious and often irreversible accident for human organism. The works of experimentation and maintenance in such zone also present the risks requiring some minimum of precaution. Thus, the main objective of this work is to design and develop (hard- and software) a prototype of educational semi-autonomous Radio Frequency controlled robot-vehicle based on 8-bit AVR-RISC Flash microcontroller system (ATmega128L) able to detect, identify and map the radioactive contaminated area. An integrated video camera coupled with a UHF video transmitter module, placed in front of the robot, will be used as visual feedback control to well direct it toward a precise place to reach. The navigation information and the data collected are transmitted from the robot toward the Computer via 02 Radio Frequency Transceivers for peer-to-peer serial data transfer in half-duplex mode. A Joystick module which is connected to the Computer's parallel port allows full motion control of the platform. Robot-vehicle user interface program for the PC has been designed to allow full control of all functions of the robot vehicles.

Keywords:

ATmega128, LND7313 Geiger Muller detector, Robotics, microcontroller, radioactivity.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été initié au sein du Département de Maintenance et Instrumentation Nucléaire de Madagascar INSTN, en collaboration avec l'Unité de l'Instrumentation du Laboratoires de l'AIEA, implantés à Seibersdorf, Vienne, Autriche.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA, Professeur Titulaire de Classe Exceptionnelle, à la fois Fondateur et Directeur Général de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (Madagascar-INSTN) jusqu'en 2017 pour avoir accepté de me prendre comme chercheur au sein de Madagascar INSTN. Ses soutiens, ses incessants conseils et son optimisme m'ont été une aide précieuse pour finir la rédaction de cette thèse. Je lui adresse également mes remerciements pour l'intérêt qu'il a porté en acceptant d'être examinateur de ce présent travail.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à Monsieur RABOANARY Roland, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Responsable de l'EAD (Accueil de l'Ecole Doctorale) intitulé : PNA-PHE (Physique Nucléaire Appliquée et Physique des Hautes Energies), qui m'a fait l'honneur de bien vouloir présider les jurys de cette thèse.

J'exprime toute ma gratitude à mon Directeur de thèse Monsieur RAMBOLAMANANA Gérard, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences au sein de l'Université d'Antananarivo qui m'a fait confiance et m'a donné l'opportunité d'effectuer ce travail de thèse. Je lui suis reconnaissant pour son encouragement et sa patience tout au long de ces longues années de thèse. Son encadrement m'a permis d'avancer dans mes moments difficiles.

Je tiens aussi à remercier vivement Monsieur RAJAOBELISON Joël, Professeur d'Enseignement Supérieur et de Recherches à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, actuel Directeur Général de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (Madagascar-INSTN) à la fois Officier National de Liaison (NLO) de l'AIEA pour Madagascar depuis 2013 m'avoir fait l'honneur d'être le rapporteur interne de mon manuscrit de thèse. Il est mon encadreur pour ma mémoire de DEA en Décembre 1997.

Monsieur RASOLOMANANA Eddy Harilala, Professeur Titulaire à l'Ecole Supérieur Polytechnique de l'Université d'Antananarivo pour m'avoir fait l'honneur d'être le rapporteur externe de mon manuscrit de thèse.

J'adresse également mes vifs remerciements aux : Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noël, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo et Monsieur RABESIRANANA Naivo, Docteur HDR à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, à la fois actuel Directeur Technique et de Développement de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (Madagascar-INSTN) d'avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury. Qu'ils trouvent ici, l'expression de toute ma gratitude.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur Stefan Hollenthoner, Expert formateur de l'AIEA en Maintenance et Instrumentation nucléaire aux Laboratoires de l'AIEA, Seibersdorf, Vienne, Autriche de m'avoir supervisé tout au long de réalisation de ce prototype.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans l'expression de toute ma sympathie à l'ensemble de mes collègues de travail à Madagascar INSTN. J'aimerais exprimer ma gratitude à toute l'équipe du Département de Maintenance et Instrumentation Nucléaire de Madagascar INSTN, en particulier Monsieur Hery Andrianiana, d'avoir contribué à la réalisation de ce projet ; un grand merci à vous tous.

Qu'il me soit permis de remercier également le personnel des différentes Directions, Départements ou Services du Labo de Madagascar INSTN.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes amis qui de près ou de loin qui m'ont donné la force et le courage nécessaires pour mener à bien cette thèse. Qu'ils voient en ces quelques lignes le témoignage de ma profonde reconnaissance.

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACE	III
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VII
REMERCIEMENTS	IX
TABLE DES MATIÈRES	XII
LISTE DES FIGURES	XIX
LISTE DES TABLEAUX	XXV

INTRODUCTION	1
Chapitre 1 : Introduction à la Télérrobotique mobile	4
1.1. Historique de robotique mobile en bref	4
1.2. Notions de la robotique mobile	5
1.3. Architecture des robots mobiles	6
1.4. Classification des Robots Mobiles	8
1.4.1. Classification selon le degré d'autonomie	8
1.4.2. Classification selon le type de locomotion	8
1.4.2.1. Les robots mobiles à roues	8
1.4.2.2. Robot mobile utilisant la chenille	9
1.4.2.3. Les robots mobiles marcheurs	10
1.5. Caractéristiques d'un robot	10
1.5.1. La charge maximale transportable	10
1.5.2. Le volume de travail	10
1.5.3. Le positionnement absolu	10
1.5.4. La répétabilité	11
1.5.5. La vitesse de déplacement	11
1.6. La téléopération et la télérrobotique	11
1.6.1. La télérrobotique dans le domaine médical et l'aide aux personnes handicapées	12
1.6.2. La télérrobotique dans le domaine sous-marin	13
1.6.3. La télérrobotique dans le domaine spatial	13

1.6.4. La télérobotique dans le domaine militaire	14
1.6.5. La télérobotique dans le domaine nucléaire	15
1.7. Histoire du Nucléaire et la Robotique	16
 Chapitre 2 : Le microcontrôleur 8-bits AVR RISC de l'Atmel® ATmega128L	19
2.1. Introduction sur le microcontrôleur	19
2.1.1. Dates importantes de l'évolution des microcontrôleurs 8-bits	19
2.1.2. Les fabricants principaux des Microcontrôleurs 8-bits	20
2.2. Le microcontrôleur AVR ATmega128L	20
2.2.1. Introduction sur ATmega128	20
2.2.2. Définition d'un AVR	21
2.2.3. Les périphériques des Atmel AVR	23
2.2.4. Caractéristiques de l'ATmega128	23
2.2.5. Synoptique de l'architecture interne de l'ATmega128	24
2.2.6. Le plan mémoire de l'ATmega128	25
2.2.8. Les Registres dans l'ATmega128	26
2.2.9. Classement des Registres dans ATmega128	29
2.3. Présentation physique de l'ATmega128	31
2.4. Description des broches de l'ATmega128	31
2.5. Architecture interne de l'ATmega128	33
2.6. Les éléments de base de l'ATmega128.....	33
2.6.1. L'Horloge Système	33
2.6.2. Le Chien de Garde ou Watchdog (WDT)	35
2.6.3. Les interruptions	36
2.6.4. La Mémoire EEPROM	40
2.6.5. Les Entrées/Sorties Numériques (PORTx)	42
2.6.6. Le Comparateur Analogique (AC)	43
2.6.7. Le Convertisseur Analogique / Numérique (ADC)	44
2.6.8. Le Timer/Compteur0 à 8 Bits (TIMER0)	44
2.6.9. Le Timer/Compteur1 et Timer/Compteur3 (Timer3) à 16 Bits	45
2.6.10. Le Timer/Compteur2 à 8 Bits (Timer2)	46

2.6.11. L'interface Série Synchrone SPI	47
2.6.12. L'interface Série USART	48
2.6.13. L'interface I2C (TWI)	49
Chapitre 3 : Généralités sur les rayonnements	51
3.1. Introduction	51
3.2. Classification des rayonnements	51
<i>a)- Les rayonnements ionisants</i>	<i>51</i>
<i>b)- Les rayonnements non ionisants</i>	<i>51</i>
3.3. Les sources de rayonnements	52
3.3.1. Les rayonnements électromagnétiques	52
3.3.2. Les rayonnements corpusculaires	53
3.4. L'interaction des rayonnements avec la matière	53
3.4.1. Section efficace d'interaction	53
3.4.2. Interaction photon – matière	54
A. Interaction élémentaire	54
A.1. La diffusion Rayleigh	54
A.2. La L'effet photoélectrique	54
A.3. La diffusion Compton	55
A.4. La production de paires d'électrons <i>(effet de matérialisation)</i>	56
A.5. Les réactions photo-nucléaires	56
B. Interaction globale	56
3.4.3. Interaction particules chargées – matière	58
A. Transfert linéique d'énergie électronique	59
B. Transfert linéique d'énergie électronique	59
C. Parcours des particules chargées (range)	59
D. La courbe de Bragg	60
3.4.4. Interaction particules chargées – matière	60
A. Transfert linéique d'énergie électronique	61
B. Transfert linéique d'énergie nucléaire	61
C. Parcours des particules chargées (range)	62

3.4.5. Interaction des neutrons avec la matière	62
A. Calcification	62
B. Les différents types d'interaction	62
a)- La diffusion élastique	62
b)- La diffusion inélastique	62
c)- La capture radiative.....	62
d)- Les réactions de capture type (n,p) et (n,α)	62
e)- Réactions de fission provoquées par les neutrons	63
3.5. Grandeurs et unité radiométrique et dosimétrique.....	63
A. Les grandeurs radiométriques	63
A.1. La fluence particulaire	63
A.2. La fluence énergétique	63
B. Grandeurs dosimétriques	64
B.1. L'exposition	64
B.2. Le kerma	64
B.3. La dose absorbée.....	64
C. Doses radio-biologiques	65
C.1. Dose équivalente	65
C.2. Dose efficace	66
 Chapitre 4 : Les détecteurs des rayonnements ionisants	 67
4.1. Principe de détection des rayonnements ionisants	67
4.2. Modes de fonctionnement du détecteur	68
4.2.1. Le mode Courant	68
4.2.2. Le mode Impulsion	68
4.3. Modes de fonctionnement du détecteur	70
4.3.1. Le temps mort (<i>Dead Time</i>)	70
4.3.1.1. Le modèle non paralysable	70
4.3.1.2. Le modèle paralysable	71
4.3.2. Mesure du temps mort	71
4.3.2.1. Méthode d'une source radioactive de courte période	71
4.3.2.2. Méthode de deux sources radioactives	72

4.3.3. Résolution en énergie d'un détecteur	72
4.3.4. Efficacité géométrique d'un détecteur	73
4.3.4.1. L'efficacité absolue	73
4.3.4.2. L'efficacité intrinsèque	74
4.4. Autres caractéristiques des détecteurs.....	74
4.4.1. La réponse géométrique	74
4.4.2. La stabilité en réponse et de l'information dans le temps	74
4.4.3. L'équivalence au milieu dans lequel nous souhaiterions véritablement faire la mesure.....	74
4.4.4. La transparence à son propre signal	75
4.5. Les détecteurs à gaz	75
4.5.1. Principe d'un détecteur à gaz	75
4.5.2. Energie moyenne nécessaire pour créer une paire d'ions	76
4.5.3. Phénomènes entraînant la disparition des charges	76
4.5.3.1. La recombinaison	76
4.5.3.2. L'attachement électronique	76
4.5.3.3. La charge d'espace	77
4.5.3.4. La diffusion	77
4.5.4. Classes de détecteurs à gaz	77
4.5.4.1. La Chambre d'Ionisation	78
4.5.4.1.1. La Chambre d'Ionisation à paroi d'air	80
4.5.4.1.2. La Chambre d'Ionisation à stylo	80
4.5.4.2. Le Compteur proportionnel	81
4.5.4.2.1. Les courbes caractéristiques d'un Compteur proportionnel	82
4.5.4.3. Le Compteur Geiger-Muller	83
4.5.4.3.1. L'extinction externe	83
4.5.4.3.2. Gaz auto coupeur (extinction interne)	84
4.6. Electronique associé au détecteur	84
4.6.1. La chaîne de mesure spectrométrique	84
4.6.2. La Composition de la chaîne de mesure	84
4.6.2.1. L'alimentation haute tension	84
4.6.2.2. Le préamplificateur	85

4.6.2.3. L'amplificateur	85
4.6.2.4. Le discriminateur	85
4.6.2.5. L'analyseur monocanal	86
4.6.2.6. L'analyseur multicanal	86

Chapitre 5 : Réalisation d'un prototype de robotde mesure à distance de la radioactivité

5.1. Présentation du prototype	89
5.1.1 L'Aspect mécanique du prototype	90
5.1.2 L'Aspect électronique du prototype	91
5.1.2.1. L'électronique de contrôle et de commande	91
5.1.2.2. L'électronique de commande et de contrôle des moteurs.	96
5.1.2.3. L'électronique de détection de la radioactivité	98
5.2. L'Aspect informatique du prototype	101
5.2.1. Le système de développement	101
5.2.2. Le module de manette de contrôle	102
5.2.3. Le programme "moniteur" du prototype	103
5.2.4. Les transmetteurs Radio Fréquence	107
5.2.4.1. La transmission à distance des données	107
5.2.4.2. La chaîne de télésurveillance	108
5.2.5. Le sous programme comptage à distance des événements radioactifs.....	109
5.2.6. Le sous programme de détection d'obstacles	110
5.2.7. Le sous programme d'odométrie	111
5.2.8. Le logiciel d'interface utilisateur	117
5.2.8.1. Programme des actions sur CEC TestPoint pour L'interface Utilisateur	122
5.3. Présentation des deux (02) prototypes réalisés	122

Chapitre 6 : Résultats sur les tests de mesure à distance de la radioactivité avec le Prototype.....

6.1. Méthodes utilisées sur les mesures expérimentales	123
6.1.2. Mesures de radioactivité avec le prototype de robot-véhicule	123

6.1.2.1. Mesures des bruits de fonds avec le prototype de robot-véhicule	124
6.1.2.2. Mesures des sources standards avec le prototype de robot-véhicule	125
6.1.2.3. Mesures des sources standards avec le "mini-con" series 1000	125
6.1.2.4. Récapitulation des résultats de mesures de la radioactivité effectuées en 09 Décembre 2005	126
6.1.2.5. Récapitulation des résultats de contre-mesures de la radioactivité effectuées en 12 Août 2016	127
6.1.2.6. Comparaison entre la mesure de distance parcourue par le prototype mesurée avec une règle graduée et celle de l'odomètre	128
Chapitre 7 : Discussion et Conclusion	129
7.1. Discussion	129
7.2. Conclusion	129
7.3. Perspective	131
ANNEXE A : Copie d'une brochure sur le système "RAM-UGV" par ROTEM Industries LTD., en Israël(1998)	132
ANNEXE B : Copies des photos de présentation du projet 2002 sur "Prototypage d'un petit Robot-Véhicule de mesure à distance de la radioactivité"	134
BIBLIOGRAPHIE	137

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Introduction à la Télérrobotique mobile	4
Figure 1.1 : Structure générale d'un robot mobile	4
Figure 1.2 : à gauche : Robot " Beast " de l'université John Hopkins (dans les années 1960) à droite : Le robot " Shakey " de Stanford en 1969 a été une plate-forme de démonstration des recherches en intelligence artificielle	5
Figure 1.3: Photo d'un télémètre Infrarouge (IR)	6
Figure 1.4: Photo d'un télémètre Ultrason	6
Figure 1.5: Photo d'un télémètre Laser	7
Figure 1.6: Photo sur positionnement global d'une voiture	7
Figure 1.7: Les modèles des robots mobiles à roues existant	8
Figure 1.8: Photos des robots mobiles à chenilles	9
Figure 1.9: Photos des robots marcheurs	10
Figure 1.10 : Exemple d'une station de téléopération de robot mobile	11
Figure 1.11 : Exemple d'implantation d'un bras manipulateur sur un handicapé	12
Figure 1.12 : Photo d'une salle de téléopération en chirurgie	13
Figure 1.13 : Photos des applications de la télérrobotique en milieu sous-marin	13
Figure 1.14 : Photos de 02 robots jumeaux " Spirit et Opportunity "	14
Figure 1.15 : Photos sur l'utilité de la téléopération dans des combats militaires	15
Figure 1.16 : Photos sur télémanipulation des produits radioactifs	15
Figure 1.17 : Photos sur la télémaintenance des installations nucléaires	16
Figure 1.18 : Photos des systèmes de télérrobotique du CEA pour le démantèlement	16
Figure 1.19 : Photos des Robots : " RIANA " - 2015 à gauche, " Meritt " - 1977 au milieu, et " Sherpa " – 1995 à droite.	17
Chapitre 2 : Le microcontrôleur 8-bits AVR RISC de l'Atmel® ATmega128L	19
Figure 2.1 : Photos des microcontrôleurs de la famille Atmel	20
Figure 2.2: Diagramme en bloc d'un contrôleur AVR	21
Figure 2.3 : Diagramme en bloc de l'architecture interne de l'ATmega128	24
Figure 2.4 : Plan mémoire interne de l'ATmega128	25
Figure 2.5 : Plan mémoire externe de l'ATmega128	26

Figure 2.6 : Structure des 32 registres dans le CPU de l'ATmega128	26
Figure 2.7 : Brochage du circuit intégré ATmega128L boitier PLCC/TQFP/MLF	31
Figure 2.8: Les trois (03) types de configuration de l'horloge dans un circuit à ATmega	34
Figure 2.9 : Synoptique de connexion d'horloge Temps Réel	34
Figure 2.10 : Synoptique du prédiviseur du Watchdog	35
Figure 2.11 : Synoptique des ports I/O PORTx en général	42
Figure 2.12 : Synoptique du comparateur analogique dans l'ATmega128	43
Figure 2.13 : Schéma en bloc de l'ADC dans l'ATmega128	44
Figure 2.14 : Synoptique du Timer/Compteur0 pour l'ATmega128	45
Figure 2.15 : Synoptique du Timer/Compteur1 à 16 Bits pour l'ATmega128	46
Figure 2.16 : Synoptique du Timer/Compteur2 à 8 bits pour l'ATmega128	47
Figure 2.17 : Synoptique de l'interface SPI pour l'ATmega128	48
Figure 2.18 : Synoptique de l' USART pour l'ATmega128.....	49
Figure 2.19 : Vu d'ensemble du Module TWI (I2C) pour l'ATmega128.....	50
 Chapitre 3 : Généralités sur les rayonnements	51
Figure 3.1 : Classification des rayonnements	52
Figure 3.2 : Principe de l'émission d'un photon lors d'une transition entre 2 niveaux énergétiques	52
Figure 3.3 : Spectre des ondes électromagnétiques	53
Figure 3.4 : Principe de l'absorption photoélectrique	55
Figure 3.5 : Principe de la diffusion Compton	55
Figure 3.6 : Distribution en énergie des électrons de recul après diffusion Compton. Les "pics" sont appelés Compton edge	56
Figure 3.7 : Domaine de prédominance en fonction de Z (cible) et de E (h _v incident)	57
Figure 3.8 : La couche demie –atténuation ou CDA.	58
Figure 3.9 : coefficient d'atténuation massique (μ/p) dans l'air en fonction de l'énergie du photon	58
Figure 3.10 : Parcours dans l'expérience de transmission d'une particule alpha	60
Figure 3.11 : Représentation d'une courbe de Bragg pour des protons dans l'eau	61
Figure 3.12 : La fluence particulaire	63
 Chapitre 4 : Les détecteurs des rayonnements ionisants	67

Figure 4.1 : Synoptique d'un détecteur de rayonnement	67
Figure 4.2 : Synoptique d'un détecteur en mode courant	68
Figure 4.3 : Synoptique d'un détecteur en mode impulsion	68
Figure 4.4 : Détecteur à constante de temps courte	69
Figure 4.5 : Détecteur à constante de temps longue	69
Figure 4.6 : Pertes de comptages selon le modèle paralysable et non paralysable	71
Figure 4.7 : Détermination du temps mort par la méthode de décroissance	72
Figure 4.8 : Définition de la résolution pour un pic parfaitement gaussien	73
Figure 4.9 : Le détecteur et la notion élémentaire d'angle solide	74
Figure 4.10 : Photos des détecteurs à semi-conducteur, à scintillation et à gaz	75
Figure 4.11 : Régions de fonctionnement des détecteurs à gaz	78
Figure 4.12 : Synoptique d'une Chambre d'Ionisation plans parallèles	79
Figure 4.13 : Synoptique d'une Chambre d'Ionisation coaxiale	79
Figure 4.14 : Synoptique d'une Chambre d'Ionisation à parois d'air	80
Figure 4.15 : Synoptique d'une Chambre d'Ionisation à Stylo	81
Figure 4.16 : La courbe de palier d'un Compteur Proportionnel	83
Figure 4.17 : Représentation d'un détecteur GM en méthode d'extinction externe	83
Figure 4.18 : La chaîne de mesure spectrométrique	84
Figure 4.19 : Synoptique de fonctionnement d'un discriminateur	86
Figure 4.20 : Principe de fonctionnement d'un analyseur monocanal	86
Figure 4.21 : Principe de fonctionnement d'un analyseur multicanal	87
Figure 4.22 : Spectre visualisé sur un analyseur multicanal (MCA)	87

Chapitre 5 : Réalisation d'un prototype de robot de mesure à distance de la radioactivité	89
Figure 5.1 : Synoptique des modules d'interfaçage montés dans l'Ordinateur	89
Figure 5.2 : Synoptique des principaux composants montés à bord du robot-véhicule	90
Figure 5.3 : Photos de présentation globale du prototype réalisé	90
Figure 5.4 : Photo du module de base à ATmega128-16	91
Figure 5.5 : Le schéma électronique de ce système minimum à ATmega128-16	92
Figure 5.6 : Schéma de la carte électronique de contrôle et de commande à ATmega128-16 (feuille 3/3)	93
Figure 5.7 : Schéma de la carte électronique de contrôle et de commande à ATmega128-16 (feuille 1/3)	93
Figure 5.8 : Photo du codeur quadratique HTO ENC1J-D28-L00128	94

Figure 5.9 : Schéma de la carte électronique de contrôle et de commande à ATmega128-16 (feuille 2/3)	94
Figure 5.10 : Le circuit imprimé de la carte électronique de contrôle et de commande à ATmega128-16	95
Figure 5.11 : Le synoptique de la carte de commande et de contrôle des 02 moteurs	96
Figure 5.12 : Le schéma électronique de la carte de commande et de contrôle des moteurs	97
Figure 5.13 : Le circuit imprimé de la carte de commande et de contrôle des 02 moteurs	98
Figure 5.14 : Photos des détecteurs G-M LND7313 et sa carte électronique associée	98
Figure 5.15 : La courbe de sensibilité du détecteur LND7313 aux rayonnements gamma [cps/mR/hr] pour le ^{60}Co	100
Figure 5.16 : Le schéma électronique du circuit de détection de la radioactivité ...	100
Figure 5.17 : Le circuit imprimé de la carte de détection de la radioactivité	101
Figure 5.18 : Présentation de la fenêtre du logiciel BASCOM-AVR, version 1.11.7.4	101
Figure 5.19 : Le programmeur des microcontrôleurs AVR "ISP - Programmer STK 300"	102
Figure 5.20 : Le schéma de principe de la manette de contrôle du robot-Véhicule ...	102
Figure 5.21 : Le circuit imprimé de la carte d'interface manette de contrôle	103
Figure 5.22 : Le schéma du circuit d'interface manette de contrôle de Robot-Véhicule.....	103
Figure 5.23 : Organigramme de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx"	104
Figure 5.24 : Le programme source de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx" en BASCOM-AVR	105
Figure 5.25 : Le programme source (suite) de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx" en BASCOM-AVR	105
Figure 5.26 : Le programme source (suite) de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx" en BASCOM-AVR	106
Figure 5.27 : Le programme source (suite) de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx" en BASCOM-AVR.....	106
Figure 5.28 : La photo du transmetteur radiofréquence de 434 MHz "WIZ-SML-IA"	108
Figure 5.29 : La photo du module transmetteur vidéo "Gigalink" de 2,4 GHz	108

Figure 5.30 : La photo de la boîte contenant le module récepteur vidéo "Gigalink" de 2,4 GHz, l'autre transmetteur radiofréquence "WIZ-SML-IA" connecté avec un module d'acquisition vidéo à interface USB "USBAV-190"	109
Figure 5.31 : Le circuit imprimé de la carte d'interface manette de contrôle	110
Figure 5.32 : Positions des 04 télémètres GP2D12 sur plateforme Robot-Véhicule .	110
Figure 5.33 : Photo, synoptique et caractéristiques du télémètre GP2D12	111
Figure 5.34 : Le sous programme source (en BASCOM-AVR) de lecture des télémètres infrarouges GP2D12 et son correspondant organigramme	111
Figure 15.35 : Représentation simplifiée de la position du Robot-Véhicule conçu dans un plan XP_0Y (x_0y)	112
Figure 5.36 : Le sous programme d'odométrie du Robot-Véhicule conçu	112
Figure 5.37 : Les photos de présentation et caractéristiques du codeur VISHAY 601-1045	113
Figure 5.38 : Représentation des 02 signaux quadratiquement déphasés et schéma synoptique de l'interfaçage entre HCTL-2020 et ATmega128-16	114
Figure 5.39 : Le sous programme de configuration / initialisation des composants électroniques de la plateforme Robot-Véhicule	115
Figure 5.40 : Le sous programme de rotation de la roue avant du Robot-Véhicule ...	116
Figure 5.41 : Les sous programmes sources en BASCOM-AVR de la lecture de l'encodeur et de calcul de position du Robot-Véhicule	116
Figure 5.42 : Présentation du logiciel d'interface graphique utilisateur pour le prototype de Robot- Véhicule écrit à l'aide de l'outil CEC TestPoint version 4.1	117
Figure 5.43 : Présentation de la routine d'initialisation du programme	119
Figure 5.44 : La routine Start Remote	119
Figure 5.45 : La routine Stop Remote	119
Figure 5.46 : La routine Check Distance	120
Figure 5.47 : La routine programme " Monitor " (côté PC)	121
Figure 5.48 : Photos des vue de dessus et vue en perspective du prototype réalisé ...	122
Figure 5.49 : Photos de présentation du prototype de robot mobile à chenilles réalisé	122

Chapitre 6 : Résultats sur les tests de mesure à distance de la radioactivité avec le Prototype

Figure 6.1 : Photo de la boîte contenant 08 sources radioactives standards scellées .	123
Figure 6.2 : Photo du débitmètre analogique portatif "mini-con" series 1000 et son cadran	125

Figure 6.3 : Représentation graphique des différences entre les mesures effectuées en 09/12/2005 avec le robot véhicule et le "mini-con series 1000"	126
Figure 6.4 : Représentation graphique des différences entre les mesures effectuées en 12/08/2016 avec le robot véhicule et le débitmètre "mini-con series 1000"	127
Figure 6.5 : Courbe comparative des distances parcourues par le robot mesurées avec une règle graduée et celles mesurées avec l'odomètre du prototype réalisé	128
 Chapitre 7 : Discussion et Conclusion	129
 ANNEXE A : Copie d'une brochure sur le système "RAM-UGV" par ROTEM Industries LTD., en Israël (1998)	132
Figure A.1 : Copie de la 1 ^{ère} page d'une brochure de publicité sur système RAM-UGV, commercialement développé par ROTEM Industries LTD., en Israël	132
Figure A.2 : Copie de la 2 ^{ème} page d'une brochure de publicité sur système RAM-UGV, commercialement développé par ROTEM Industries LTD., en Israël	133
 ANNEXE B : Copies des photos de présentation du projet 2002 sur "Prototypage d'un petit Robot-Véhicule de mesure à distance de la radioactivité"	134
Figure B.1 : Copie d'une photo de couverture d'un rapport sur la situation de la conception d'un prototype d'un petit robot-véhicule de mesure à distance de la radioactivité, contrôlé par une liaison Infrarouge	134
Figure B.2 : Copie d'une photo de présentation d'une fenêtre du logiciel d'interfaçage de ce prototype d'un robot-véhicule contrôlé par une liaison IR (1/2)	135
Figure B.3 : Copie d'une photo de présentation d'une fenêtre du logiciel d'interfaçage de ce prototype d'un robot-véhicule contrôlé par une liaison IR (2/2)	136

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Introduction à la Télérrobotique mobile	4
Chapitre 2 : Le microcontrôleur 8-bits AVR RISC de l'Atmel® ATmega128L	19
Tableau 2.1 : Tableau extrait des modèles de l'ATmega (<i>établi en 2004</i>)	22
Tableau 2.2 : Liste des 66 registres existant dans la gamme ATmega	27
Tableau 2.3 : Suite de la liste des 66 registres existant dans la gamme ATmega	28
Tableau 2.4 : Tableau sur les types et option d'horloge système d'AVR ATmega ...	34
Tableau 2.5 : Classement des vecteurs d'interruptions de l'ATmega128	36
Tableau 2.6 : Suite de classement des vecteurs d'interruptions de l'ATmega128	37
Chapitre 3 : Généralités sur les rayonnements	51
Tableau 3.1 : Facteur de pondération tissulaire en fonction des organes ou tissu	66
Chapitre 4 : Les détecteurs des rayonnements ionisants	67
Tableau 4.1 : Energie moyenne nécessaire pour créer une paire d'ions	76
Tableau 4.2 : Spectre hypothétique	88
Chapitre 5 : Réalisation d'un prototype de robot de mesure à distance de la radioactivité	89
Tableau 5.1 : Spécifications du détecteur LND7313	99
Tableau 5.2 : Principaux caractères en ASCII de commandes entre l'Ordinateur et le robot	104
Chapitre 6 : Résultats sur les tests de mesure à distance de la radioactivité avec le Prototype	123
Tableau 6.1 : Valeurs des bruits de fonds prises en 09/12/2005 sur différent temps de mesures	124
Tableau 6.2 : Séries de mesures à distance de la radioactivité effectuées en 09 Décembre 2005 avec le prototype sont dressées dans ce tableau ci-dessous	125
Tableau 6.3 : Résultats des mesures comparatives entre le robot et le dosimètre analogique "mini-con series 1000" (09 Décembre 2005)	126
Tableau 6.4 : Résultats des contre-mesures comparatives entre le robot et le débitmètre analogique "mini-con series 1000" (12 Août 2016)	127
Chapitre 7 : Discussion et Conclusion	129

INTRODUCTION

Le nucléaire est un sujet en constant développement dans le monde. Il y a aussi d'autre part les risques et les dangers qu'il apporte à cause de l'irradiation externe, la contamination, les champs de rayonnements dans les réacteurs, sans parler des déchets et influents radioactifs. Madagascar utilise de plus en plus des sources radioactives en ce moment que ce soit dans les industries, les hôpitaux ou dans les exploitations minières. Du côté des compétences locales en matière de radioprotection, peu d'appareils ont été localement développés pour détecter à distance de l'existence de radioactivité. Ce qui nécessite donc pour les pays en voie de développement tel que Madagascar de trouver une issue pour palier à ce problème.

Les machines intelligentes, telles que distributeurs automatiques, contrôle d'accès, fabrication à la chaîne, ..., etc., jouent un rôle important dans les activités de tous les jours. Les robots font partie de ces machines et aident les êtres humains dans leurs activités difficiles ou ennuyeuses. En effet, dans un environnement hostile à l'homme c'est un robot qui va le remplacer, sans oublier les tâches domestiques simples telles que : tondre le gazon, passer l'aspirateur... etc [9], [10], [13].

Actuellement, les robots mobiles existent et sont utilisés sous larges gammes de dimensions : de nano-robots aux robots mobiles géants et industriels. Parmi les grands domaines de leurs applications sont : *le domaine nucléaire, le domaine spatial, le domaine sous-marin, le domaine militaire, le domaine médical et l'aide aux personnes handicapées. Ils sont aussi utilisés dans l'industrie, dans l'agriculture, dans l'exploitation minière et dans les travaux de construction* [7], [8].

D'où ce travail de thèse sur conception et réalisation d'un prototype d'un robot mobile radiocommandé capable d'effectuer des mesures à distance de la radioactivité. L'environnement dans lequel évolue ce prototype est pour le moment le sol horizontal cimenté de notre laboratoire Madagascar - INSTN ayant $30 \times 25\text{m}^2$ de surface.

Un des problèmes majeurs de la robotique mobile est la planification et le contrôle de mouvement d'un robot mobile dans l'environnement où il évolue. Autour de ce problème de planification et contrôle de mouvement, de nombreuses études ont été réalisées

dans le but de développer des méthodes générales pour guider et communiquer avec les robots mobiles [14].

Notre travail s'inscrit dans le cadre de fabrication d'un prototype de Robot-Véhicule capable de connaître et faire des mesures à distance de la radioactivité de l'endroit où il se situe distant ou loin de son Téléopérateur. Ce prototype est semi-autonome et totalement contrôlé par une liaison Radiofréquence.

Deux (02) types de plateformes des Robots mobiles de type véhicule ont été réalisés et testés au cours de développement de ce projet :

- l'un (01) de type à chenilles qu'on n'a pas développé dans ce manuscrit, sujet d'un étudiant titulaire d'un diplôme de DEA en Physique Nucléaire, Physique Théorique et Physique Appliquée en 2006, option Instrumentation, de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo (cf. fig. 5.49, page 121).

- l'autre de type tricycle qu'on va développer dans ce manuscrit.

Brièvement, ce prototype du Robot à chenilles qu'on a développé est constitué d'une carrosserie en plastique rigide bicolore (noir et orange) dotée de six (06) paires de roues reliées chacune par une chaîne. Deux (02) moteurs à courant continu de +12V sont transversalement montés dans sa plateforme pour sa locomotion. Techniquement, son déplacement se fait lorsque ces deux (02) moteurs tournent à la même vitesse à la fois dans le même sens. Le virage à gauche ou à droite se fait en diminuant la vitesse de l'un (01) de ces deux (02) moteurs. Un (01) détecteur Geiger-Müller LND7313 est aussi monté dans sa plateforme pour le comptage à distance des événements lors de la présence de rayonnements ionisants. Et tous les composants qu'on a utilisé sur le prototype de Robot mobile de type tricycle est utilisable pour ce type à chenilles.

Et pour arriver à réaliser ce premier (1^{er}) prototype de ce robot mobile de type tricycle, ce travail de thèse est divisé en sept (07) chapitres comme suit :

Le premier (1^{er}) chapitre est consacré sur l'introduction à la Télérobotique mobile (définitions, historique, les différents types) et surtout les constituants d'un robot mobile.

Le deuxième (2^{ième}) chapitre consiste à donner en bref des informations sur le microcontrôleur 8-bits AVR RISC de l'Atmel® ATmega128, le cœur de la carte de commande et de contrôle du prototype.

Le troisième (3^{ième}) chapitre donne des généralités sur les rayonnements (classification : ionisants et non ionisants, sources des rayonnements ionisants, leurs interactions avec la matière et quelques notions sur les grandeurs, unités radiométrique et dosimétrique).

Le quatrième (4^{ième}) chapitre nous introduise aux détecteurs de rayonnements ionisants (principe et techniques de détection, mode de fonctionnement, caractéristiques et l'électronique associé aux détecteurs de rayonnements ionisants).

C'est le cinquième (5^{ième}) chapitre qui décrit en détails les étapes de réalisation de ce prototype de robot véhicule de mesure à distance de la radioactivité (présentation du prototypé réalisé; son aspect mécanique, électronique et informatique).

Le sixième (6^{ième}) chapitre présente quelques résultats sur les tests de mesures à distance de la radioactivité effectués avec le prototype de robot réalisé; et compare ces résultats de mesures avec celles effectuées avec un débitmètre analogique portatif "mini-con" series 1000.

Comme tout travail de recherche, une discussion, conclusion et perspective s'impose au septième (7^{ième}) et dernier chapitre. Ce chapitre reprend les points essentiels de tout le travail réalisé et propose des perspectives envisagées.

Chapitre 1 : Introduction à la Télérrobotique mobile

1.1. Historique de robotique mobile en bref

La **robotique** est l'ensemble des techniques, scientifiques ou industriels, permettant la conception et la réalisation des machines automatiques ou des robots. Tandis que le **robot** est une machine équipée de capacités de perception, de décision et d'action qui lui permettent d'agir de manière autonome dans son environnement en fonction de la perception qu'il en a. Autrement, un **robot** c'est appareil effectuant, grâce à un système de commande automatique à base de micro-processeur, une tâche précise pour laquelle il a été conçu dans le domaine industriel, scientifique ou domestique.

La **robotique** est un domaine pluridisciplinaire qui implique de nombreuses thématiques telles que la mécanique, la mécatronique, l'électronique, l'automatique, l'informatique ou l'intelligence artificielle. Ci-dessous l'organigramme de la structure constituante d'un robot mobile.

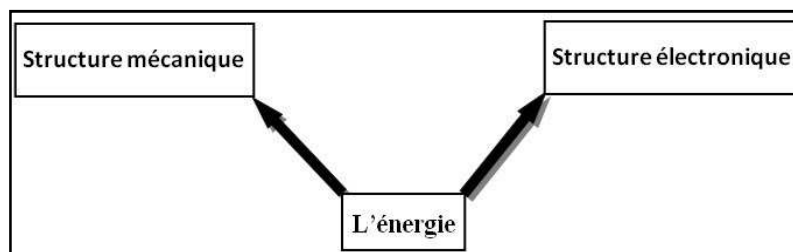


Figure 1.1 : Structure générale d'un robot mobile

Le terme de robot apparaît pour la première fois dans une pièce de Karel Capek en 1920 : *Rossum's Universal Robots*. Il vient du tchèque "robota" équivalent de la servitude. Le terme de robotique quant à lui est apparu en 1942.

Historiquement, "**la Tortue**" : robot construit par Grey Walter dans les années 1950, est l'un des premiers robots mobiles autonomes. Dans les années 60, les recherches en électronique vont conduire, avec l'apparition du transistor, à des robots plus complexes comme le robot "**Beast**" de l'université John. Les premiers liens entre la recherche en intelligence artificielle et la robotique apparaissent à Stanford en 1969 avec le robot "**Shakey**", plate-forme de démonstration. Le robot "**Stanford Cart**" date de la fin des années 1970. En France, le robot "**Hilare**" est le premier robot construit en 1977 au LAAS, à Toulouse.

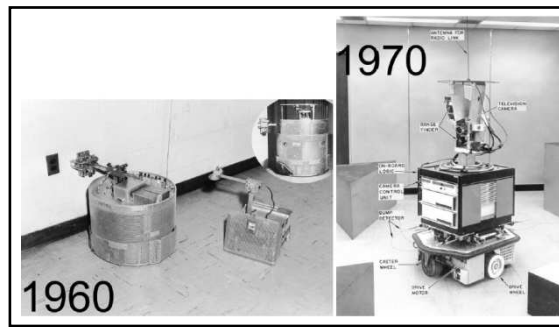


Figure 1.2 : - à gauche : Robot "**Beast**" de l'université John Hopkins dans les années 1960.

- à droite : Le robot "**Shakey**" de Stanford en 1969 a été une plateforme de démonstration des recherches en intelligence artificielle.

Le robot "**Genghis**", développé par Rodney Brooks au MIT au début des années 1990, a permis de passer de gros robots à de petits robots.

Ces développements ont continué et l'arrivée sur le marché depuis les années 1990 de plateformes intégrées telles que le robot "**pioneer**" de la société Mobile Robots a permis à de très nombreux laboratoires de travailler sur la robotique mobile et à conduit à une explosion de la diversité des thèmes de recherche.

Ainsi, même si les problèmes de déplacement dans l'espace et de modélisation de l'environnement restent difficiles et cruciaux, des laboratoires ont pu travailler sur des approches multi-robot, la problématique de l'apprentissage ou sur les problèmes d'interactions entre les hommes et les robots.

1.2. Notions de la robotique mobile

L'appellation "**robot mobile**" désigne généralement un véhicule équipé de capacités de perception, de décision et d'action qui lui permettent d'agir de manière autonome ou semi-autonome dans un environnement complexe, parfois évolutif, partiellement connu ou inconnu, et d'exécuter les tâches programmées sans intervention humaine ou avec une intervention réduite.

Il existe deux (02) principaux modes de fonctionnement pour un robot mobile : **télé-opéré** et **autonome**. En mode télé-opéré [H. Zerfa], une personne pilote le robot à distance ; elle donne ses ordres via une interface de commande (manette de jeu, clavier...), et ceux-ci sont envoyés au robot via un lien de communication (internet, satellite ...). Le robot doit donc obéir aux ordres de l'opérateur qui perçoit l'environnement autour du robot, par différents moyens (camera, radar...), de manière à donner des ordres adaptés au robot. A l'inverse, en mode autonome [Bilgic] [R. SIEGW] le robot doit prendre ses propres décisions. Cela signifie qu'il doit être capable à la fois de percevoir correctement son environnement, mais également de savoir comment réagir en conséquence, suivant le niveau d'autonomie. C'est à lui d'envisager son parcours et de déterminer avec quels mouvements il va atteindre son objectif.

1.3. Architecture des robots mobiles

Généralement, un robot mobile est constitué des trois (03) structures :

- **une structure mécanique** qui assure le mouvement du robot par des roues motrices placées en fonction du type de mouvement et la précision de la tâche voulue.

- **une structure instrumentale** formée d'un certain nombre de capteurs de sécurité afin de leur donner au robot une certaine reconnaissance de l'environnement auquel il évolue. Selon l'application, ces capteurs peuvent être des boutons poussoirs, des caméras, des télémètres infrarouges, des télémètres ultrasonores, des télémètres lasers, des caméras, des capteurs tactiles, des boussoles, des balises, un GPS...

Certains principes de fonctionnement de ces capteurs sont expliqués dans les paragraphes suivants :

- **Les capteurs infrarouges** sont constitués d'un ensemble **émetteur – récepteur** fonctionnant avec des radiations non visibles, dont la longueur d'onde est juste inférieure à celle du rouge visible. La mesure des radiations infrarouges étant limitée et, en tout état de cause, la qualité très dégradée d'un (01) mètre, ces dispositifs ne servent que rarement de télémètres. On les rencontrera le plus souvent comme **détecteurs de proximité**.

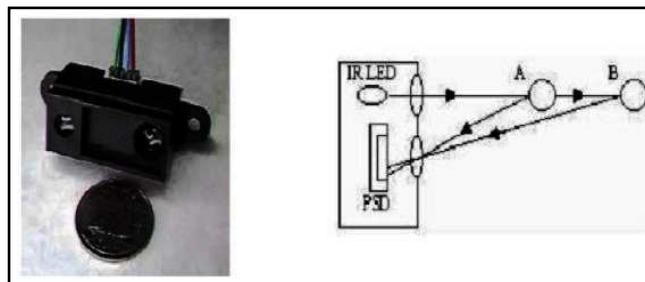


Figure 1.3 : Photo d'un télémètre Infrarouge (IR)

- **Les capteurs ultrasonores** utilisent des vibrations sonores dont les fréquences ne sont pas perceptibles par l'oreille humaine. Les fréquences couramment utilisées dans ce type de technologie vont de 20 kHz à 200 kHz. Les ultrasons émis se propagent dans l'air et sont réfléchis partiellement lorsqu'ils heurtent un corps solide, en fonction de son impédance acoustique. L'écho en retour prend la forme d'une onde de pression à l'image des vaguelettes circulaires de formant la surface de l'eau lors qu'on y jette une pierre.

La distance entre la source et la cible peut être déterminée volume séparant l'émission des ultrasons du retour de l'écho.

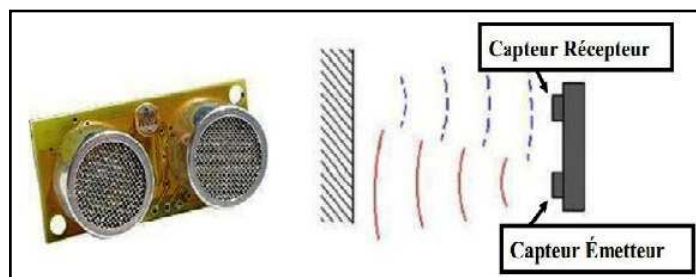


Figure 1.4 : Photo d'un télémètre Ultrason

- **Les Télémètres Lasers** Les télémètres lasers sont à ce jour le moyen le plus répandu en robotique pour obtenir des mesures précises de distance. Leur principe de fonctionnement est le suivant :

A un instant donné, une impulsion lumineuse très courte est envoyée par l'intermédiaire d'une diode laser de faible puissance. La réflexion de cette onde donne un écho qui est détecté au bout d'un temps proportionnel à la distance capteur obstacle. La direction des impulsions est modifiée par rotation d'un miroir. Par l'angle de balayage couvrant généralement entre 100 et 180 degrés.



Figure 1.5 : Photo d'un télémètre Laser

- **Les caméras** : l'utilisation d'une camera pour percevoir l'environnement est une méthode attractive car elle semble proche des méthodes utilisées par les humains. Le traitement des données volumineuses et complexes fournies par ces capteurs reste cependant difficile à l'heure actuelle, même si cela reste une voie de recherche très explorée.

- **Le GPS** (Système de Positionnement Global en Anglais Global Positioning System) est un système de balises dont on a placé les balises sur des satellites en orbite terrestre et qui est par conséquent accessible de quasiment partout à la surface du globe. Ce système permet donc d'avoir une mesure de sa position dans un repère global couvrant la terre avec une précision variant de quelques dizaines de mètres à quelques centimètres suivant les équipements.

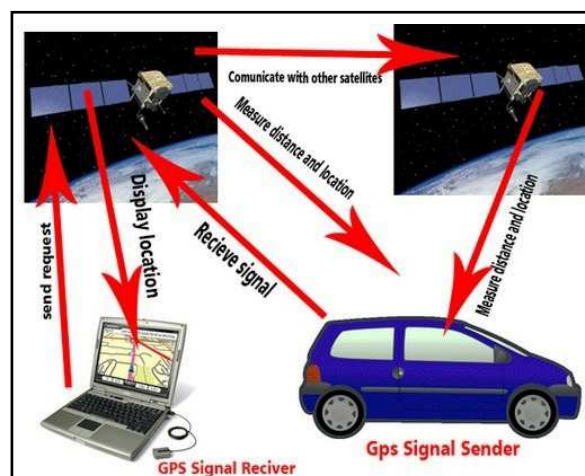


Figure 1.6 : Photo sur positionnement global d'une voiture

- **Structure informatique** : Une commande numérique est impérative, afin de bien analyser les différentes informations, soit du système de perception ou de localisation. Cette commande peut être à base d'un microprocesseur ou microcontrôleur.

1.4. Classification des Robots Mobiles

On peut classer les robots mobiles selon leur degré d'autonomie, système de locomotion, leur domaine d'application, leur système de localisation, l'énergie utilisée...

Mais on se limite à ces cinq (05) classifications qui semblent être plus intéressantes dans ce travail :

1.4.1. Classification selon le degré d'autonomie

Un robot mobile autonome est un système automoteur doté de capacités décisionnelles et de moyens d'acquisition et de traitements de reformation qui lui permettent d'accomplir sous contrôle humain réduit un certain nombre de tâches, dans un environnement non complètement connu. On peut citer quelques types :

- **Véhicule télécommandé par un opérateur** : ce type de robot est commandé par un opérateur qui lui impose chaque tâche élémentaire à réaliser.
- **Véhicule télécommandé au sens de la tâche à réaliser** : ce robot contrôle automatiquement ses actions.
- **Véhicule semi-autonome** : ce type de véhicule réalise des tâches prédéfinies sans l'aide de l'opérateur.
- **Véhicule autonome** : ce dernier réalise des tâches semi-définies.

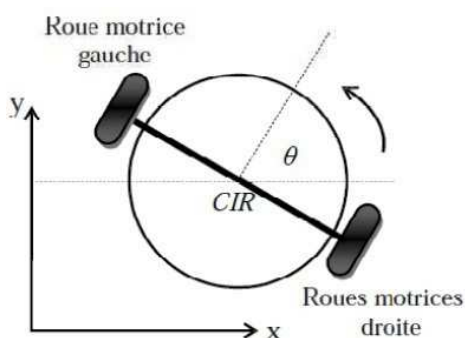
1.4.2. Classification selon le type de locomotion

Selon le système de locomotion, on peut distinguer en quatre (04) types des robots :

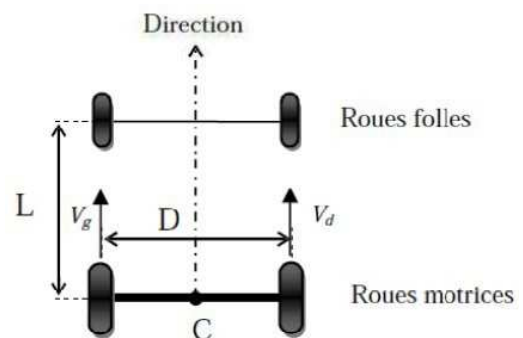
1.4.2.1. Les robots mobiles à roues

Compte tenu de la simplicité du mécanisme de locomotion utilisé, ce type de robot est le plus répandu actuellement. La plupart des robots mobiles à roues opèrent dans des sites aménagés, des sites industriels ou des environnements intérieurs; mais il existe également des applications en environnements extérieurs, comme l'exploration spatiale.

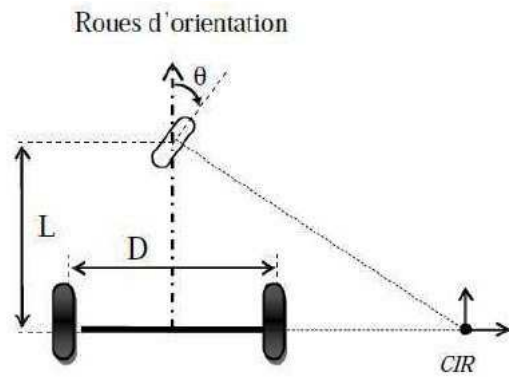
La grande majorité des robots de ce type présente des contraintes de non holonomie qui limitent le mouvement instantané que le robot peut réaliser, car il existe pour toutes ces roues un point unique (centre instantané de rotation (CIR)) de vitesse nulle autour duquel le robot tourne de façon instantanée. La commande se fait par la motorisation des roues installées. Les modèles des robots mobiles à roues existant sont illustrés sur les figures suivantes :



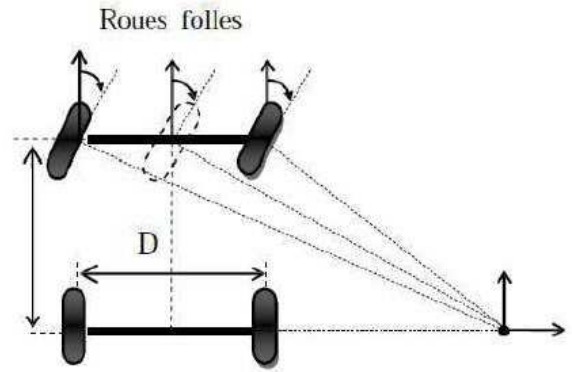
(a)- **Robot mobile de type unicycle**



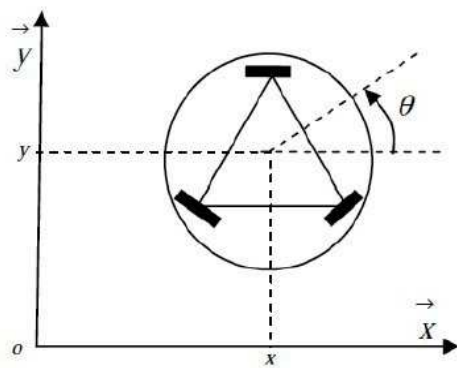
(b)- **Robot mobile différentielle**



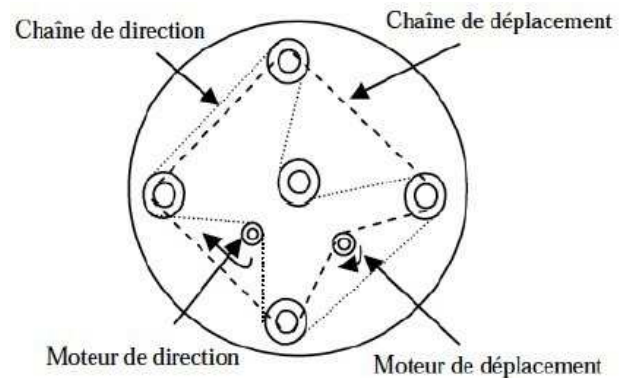
(c)- Robot mobile de type tricycle



(d)- Robot mobile de type voiture



(e)- Robot mobile omnidirectionnel



(f)- Robot mobile à traction synchrone

Figure 1.7 : Les modèles des robots mobiles à roues existant

1.4.2.2. Robot mobile utilisant la chenille

Lorsque le terrain est accidenté, les roues perdent leur efficacité de locomotion. Ceci limite la capacité de mouvement du robot mobile équipé de ce type de système de locomotion.

Dans ces conditions, les chenilles sont plus intéressantes car elles permettent d'augmenter l'adhérence au sol et de franchir des obstacles plus importants.



Figure 1.8 : Photos des robots mobiles à chenilles

1.4.2.3. Les robots mobiles marcheurs

Les robots mobiles marcheurs sont destinés à réaliser des tâches variées dont l'accès au site est difficile et dangereux à l'homme. Leur structure dans plusieurs degrés de liberté permet un rapprochement avec les robots manipulateurs. On distingue les robots marcheurs à deux (02) jambes (*humanoïdes*), à quatre (04) pattes (*type cheval*), et à six (06) pattes (*type araignée*).



Figure 1.9 : Photos des robots marcheurs

1.5. Caractéristiques d'un robot

Un robot doit être choisi en fonction de l'application qu'on lui réserve. Voici paramètres à prendre, éventuellement, en compte :

1.5.1. La charge maximale transportable

De quelques kilos à quelques tonnes, à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élongation maximum).

1.5.2. Le volume de travail

Défini comme l'ensemble des points qu'on peut atteindre par l'organe terminal.

Tous les mouvements ne sont pas possibles en tout point du volume de travail. L'espace (volume) de travail (*reachable workspace*), également appelé espace de travail maximal, est le volume de l'espace que le robot peut atteindre via au moins une orientation.

L'espace de travail dextre (*dextrous- workspace*) est le volume de l'espace que le robot peut atteindre avec toutes les orientations possibles organe terminal. Cet espace de travail est un sous-ensemble de l'espace de travail maximal.

1.5.3. Le positionnement absolu

Correspondant à l'erreur entre un point souhaité (réel), défini par une position et une orientation dans l'espace cartésien et le point atteint. Il est calculé via le modèle géométrique inverse du robot. Cette erreur est due au modèle utilisé, à la quantification de la mesure de position et à la flexibilité du système mécanique.

En général, l'erreur de positionnement absolu, également appelée précision, est de l'ordre de 1 mm.

1.5.4. La répétabilité

Ce paramètre caractérise la capacité que le robot à retourner vers un point (position, Orientation) donné. La répétabilité correspond à l'erreur maximum de positionnement sur un point prédéfini dans le cas de trajectoires répétitives.

1.5.5. La vitesse de déplacement

Vitesse maximum en élongation maximum ou accélération. Il existe d'autres caractéristiques comme :

- La masse du robot.
- Le coût du robot.
- La maintenance, ...

1.6. La téléopération et la télérobotique

La **téléopération** désigne les principes et les techniques qui permettent à l'opérateur humain d'accomplir une tâche à distance, à l'aide d'un système robotique d'intervention (dispositif esclave), commandé à partir d'une station de contrôle (dispositif maître), par l'intermédiaire d'un canal de télécommunication.

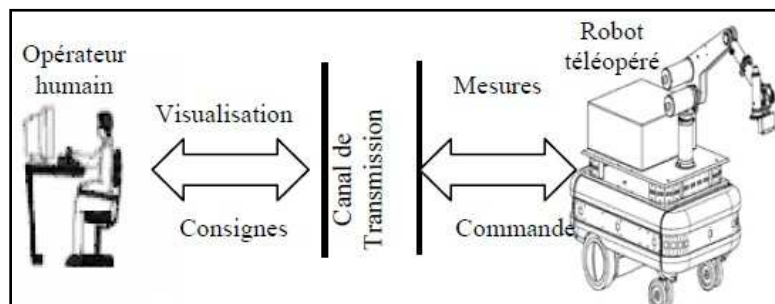


Figure 1.10 : Exemple d'une station de téléopération de robot mobile

Elle a pris ses origines dans le besoin de prolonger le geste de l'homme au delà de la main, et se poursuit par l'ambition de se trouver là où on ne se trouve pas (Téléprésence). La téléopération est un axe de recherche actuel, elle suscite beaucoup d'intérêts et trouve son application dans diverses disciplines et activités de la vie moderne. Elle concerne la réalisation de travaux dépassant les capacités physiques de l'homme tels que la manipulation d'objets lourds, ou présentant un danger (cas de robots industriels), ou bien des travaux qui sont réalisés sur des sites inconnues ou hostiles à l'homme (tels que: les robots d'exploration martiens, robots industriels, les robots sous marins, les robots dans des sites hautement radioactifs, les robots chirurgiens, les robots destinés à l'exploration de l'univers, ...). On peut citer les grands domaines d'application de la téléopération : *le domaine nucléaire, le domaine spatial, le domaine sous-marin, le domaine militaire, le domaine médical et l'aide aux personnes handicapées.*

De nos jours, la téléopération s'applique aussi bien aux bras redondants, aux préhenseurs mécaniques polyarticulés, et à diverses sortes de robot mobiles à roues, à chenilles et à pattes.

La **télérobotique** résulte en fait de la fusion de la téléopération et la robotique ; elle est une forme de téléopération lorsque l'opérateur réalise des tâches à distance en utilisant un robot.

1.6.1. La télérobotique dans le domaine médical et l'aide aux personnes handicapées

Le domaine d'aide aux personnes handicapées est extrêmement riche de possibilités. De nombreux projets ont été étudiés et mis en œuvre afin d'aider des handicapés à mieux vivre. On peut citer par exemple les projets SPARTACUS et le projet MASTER du **CEA** (Commissariat à l'**E**nergie **A**tomique) ont permis l'automatisation de quelques tâches quotidiennes à partir d'une commande utilisant les mobilités disponibles de l'handicapé. L'aide aux personnes handicapées moteur se développe depuis quelques années. La robotique mobile peut y apporter sa contribution. Défini en lien avec l'Association Française contre les Myopathies (AFM), Le projet ARPH7 a comme objectif d'embarquer un bras manipulateur sur une base mobile autonome pour donner aux personnes handicapées la possibilité de réaliser seules des tâches de la vie quotidienne, soit dans son environnement proche en vision directe, soit dans un environnement plus lointain en vision indirecte (en mode de téléopération).



Figure 1.11 : Exemple d'implantation d'un bras manipulateur sur un handicapé

Les médecins et les chirurgiens, utilisent de plus en plus de robots afin de les assister ou même de les remplacer dans certaines tâches. La téléchirurgie semble avoir un avenir prometteur, en particulier dans la chirurgie oculaire, qui réclame une grande précision et une sécurité extrême. D'autres applications ont été trouvées en chirurgie mini invasive. En effet, de plus en plus d'interventions se pratiquent sous endoscopie. L'accès aux organes à opérer se fait par de petites incisions à travers lesquelles le chirurgien fait passer les instruments. Les exemples les plus connus de robots téléopérés sont sans doute les robots "**Da Vinci**" fourni par Intuitive Surgical et "**Zeus**" de Computer Motion.

"**Da Vinci**" est un système restituant au chirurgien une intuitivité des mouvements proche de celle des interventions ouvertes. Il est constitué d'un robot équipé d'un bras portant un endoscope stéréoscopique et de deux bras instrumentés. Ces derniers sont asservis aux deux bras (02) maîtres de la console de commande d'où téléopère le chirurgien. Celui-ci visualise l'intérieur du patient en relief grâce à l'endoscope stéréo.

Le concept de téléopération mise en œuvre sur "**Da Vinci**" a été développé à l'extrême avec "**Zeus**". En effet, en septembre 2001, le professeur Marescaux a téléopéré ce système depuis New York en réalisant avec succès une cholécystectomie (ablation de la vésicule biliaire) sur une patiente hospitalisée à Strasbourg. Cette première opération transatlantique baptisée "Opération Lindbergh", fut réalisable grâce à l'utilisation d'un réseau de communication à haut débit de France Télécom (10 mégabits/seconde). Le délai entre le geste du chirurgien sur la console maître et le retour visuel des mouvements des manipulateurs a pu être réduit à 150 ms.

L'évolution des systèmes de téléopération est étroitement liée à l'évolution des technologies de communication et de l'interaction homme-machine



Figure 1.12 : Photo d'une salle de téléopération en chirurgie

1.6.2. La télérobotique dans le domaine sous-marin

A l'exception des applications militaires, les applications civiles sont principalement liées à l'industrie de l'offshore, l'inspection, la construction et la maintenance de conduites, structures, câbles sous-marins voire aussi des investigations scientifiques (épaves, espèces marines, etc.). Des bras manipulateurs embarqués à bord de véhicules peuvent être autonomes ou même téléopérés. Ce domaine continue à être le principal domaine d'activité en nombre de systèmes de télérobotique.

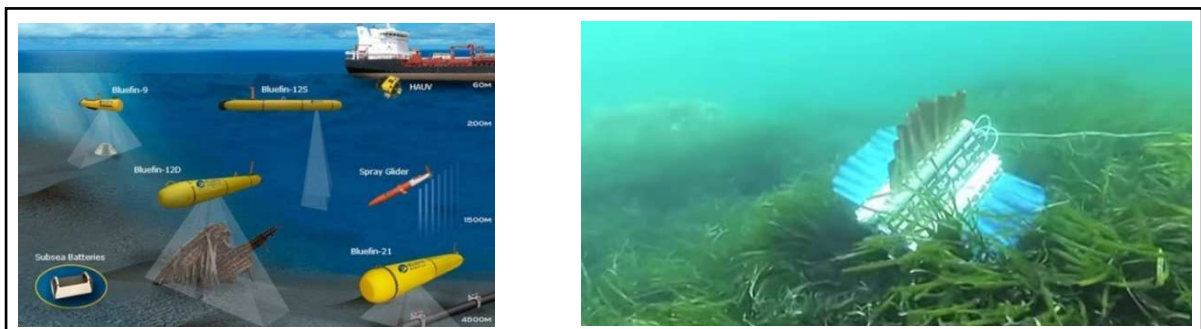


Figure 1.13 : Photos des applications de la télérobotique en milieu sous-marin

1.6.3. La télérobotique dans le domaine spatial

Les principales applications de la télérobotique dans ce domaine sont l'exploration, la maintenance de satellites et de stations spatiales orbitales. L'éloignement du site de

travail et l'important temps de transmission des informations, impliquent l'utilisation de robots ayant une grande autonomie (basée sur une architecture complexe et intégrant de nombreux capteurs) sans pour autant exclure la possibilité de les téléopérer (la mission "*Mars Pathfinder*" avec le robot "**sojourner**" en 1997 sur la planète Mars en est un exemple).

Un autre exemple est la mission "*Mars Exploration Rovers*" avec les deux (02) robots jumeaux "**Spirit** et **Opportunity**" en 2004 sur la planète Mars. En effet, en janvier 2004, deux (02) grands robots d'exploration équipés d'éléments scientifiques perfectionnés se sont posés sur le sol martien et explorent la surface de la planète à la recherche de preuves supplémentaires sur la présence d'eau liquide sur Mars dans un lointain passé. Cette mission est la plus sophistiquée jamais envoyée vers la planète rouge par la NASA.

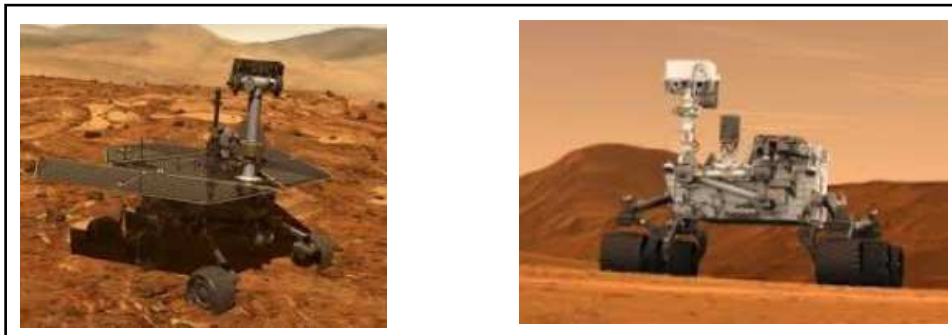


Figure 1.14 : Photos de 02 robots jumeaux "**Spirit**" et "**Opportunity**"

Les objectifs scientifiques de la mission *Mars Exploration Rovers* se concentrent autour de deux points forts :

- déterminer l'histoire du lieu d'atterrissage (son climat, sa géologie etc. ...)
- faire une série de mesures sur le terrain exploré.

Deux (02) catégories d'application peuvent être distinguées dans le domaine spatial :

- *application dans l'espace proche* : désigne les orbites basses sur lesquelles une présence d'astronautes peut être assurée temporairement grâce à la navette spatiale ou de façon prolongée à bord d'une station orbitale.
- *applications dans l'espace lointain, exploration du système solaire* : ce sont des applications à caractère exclusivement scientifique et ont pour objectif d'améliorer la connaissance du système solaire.

1.6.4. La télérobotique dans le domaine militaire

La télérobotique intervient pour la désactivation de mines, l'observation de territoires ennemis ainsi que la télécommande d'engins tels que les chars, les avions et les hélicoptères.

En raison de la complexité du milieu terrestre, l'apparition de robots autonomes au sein du système de combat n'est pas encore d'actualité. En revanche, la téléopération de plateformes robotisées permet dès aujourd'hui d'assister l'homme dans certaines tâches

pénibles ou en milieu hostile. Dans cette optique, Giat Industries développe des technologies en matière de téléopération au combat afin de permettre aux combattants de poursuivre leur mission malgré les risques d'agression.

L'armée de terre imagine, dès à présent, ce que sera le combat de contact de demain autour du concept de bulle opérationnelle aéroterrestre (BOA). Giat Industries en partenariat avec Thales et EADS, travaille actuellement sur des projets de démonstrateurs visant à préparer cette nouvelle génération de blindés. Le groupe étudie notamment la mise en œuvre de drones et de robots téléopérés à partir de plateformes de combat pour des missions d'acquisition.



Figure 1.15 : Photos sur l'utilité de la téléopération dans des combats militaires

1.6.5. La télérobotique dans le domaine nucléaire

Le nucléaire a été le premier domaine à stimuler le développement de systèmes de télérobotique. L'industrie nucléaire s'intéresse généralement aux applications suivantes :

– **la manipulation de produits radioactifs** : elle se fait en cellule spécialisée, dans laquelle des télémanipulateurs mécaniques sont utilisés pour amener et retirer le produit. L'opérateur travaille en vision directe et il n'y a pas de problèmes d'éloignement. L'introduction de la télérobotique n'est pas encore envisagée dans ce type d'application.



Figure 1.16 : Photos sur télémanipulation des produits radioactifs

– **la maintenance des installations** : ce type de tâche est essentiellement réalisé par des machines spécialisées. Ces dernières offrent l'avantage d'être parfaitement adaptées à la tâche. Par contre leur mise en œuvre est longue et elles ne sont pas adaptées aux changements de situation et ne peuvent être réutilisées dans d'autres tâches. La

télérobotique est en train de trouver sa place suite aux recherches menées ces dernières années.



Figure 1.17 : Photos sur la télémaintenance des installations nucléaires

– **le démantèlement d'installation et l'intervention suite à un incident** : l'utilisation des systèmes télérobotique est une voie en cours de recherche concernant ces deux (02) domaines. L'exploitation des nouvelles technologies comme la réalité virtuelle/augmentée est un atout favorable pour la poursuite de ces recherches. La figure 1.18 illustre l'utilisation d'un système de télérobotique du CEA pour le démantèlement d'installation et l'intervention dans le milieu nucléaire.

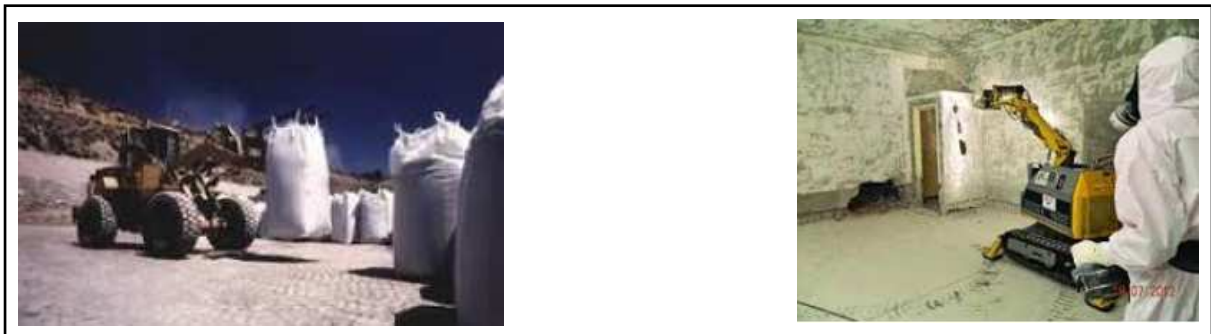


Figure 1.18 : Photos des systèmes de télérobotique du CEA pour le démantèlement d'installation et l'intervention dans le milieu nucléaire

1.7. Histoire du Nucléaire et la Robotique

En matière nucléaire, la robotique connaît plusieurs domaines d'application. Les premiers robots développés aux Etats-Unis dès les années 1950, se résument à des bras de manipulation, dotés de caméras et de projecteurs. Après l'accident de **Three Mile Island** en 1979, les tâches de surveillance, d'inspection et de décontamination étaient effectuées par des manipulateurs télécommandés, dont les célèbres robots "**Fred**" (*pour la surveillance à distance*), "**SISI**", "**ROSA**" (*pour enlever le combustible du cœur*) et autre "**Louie**".

Un des premiers prototypes de robot téléopéré français construit pour intervenir en terrain très radioactif a été imaginé dès 1975 par le CEA. Le robot "**MERIT**" (**M**odule d'**E**ntree et de **R**éparation **I**nterne de **T**uyauteries d'eaux) était capable de monter et descendre les escaliers, franchir des obstacles et se saisir d'objets, tout en résistant aux radiations, pour

effectuer des observations vidéo, contrôles de sécurité et des opérations de maintenance dans les circuits hydrauliques des centrales nucléaires.

En 1983, le robot "**MIR**" (**M**achine d'**I**nspection des **R**éacteurs rapides) a suivi son exemple pour réaliser des contrôles de soudures par ultrasons entre la cuve principale et la cuve de sécurité de **Superphénix**. Vinrent ensuite le robot "**Centaure**", commandé à 500 mètres, pour intervenir en milieu hostile après un accident nucléaire et le robot "**Sherpa**", doté de six (06) jambes télescopiques et d'un plateau pour porter des charges lourdes.

De fait, le robot "**Centaure**" a prouvé toute son efficacité après l'accident de **Tchernobyl** et la création en 1988 du Groupe d'intervention robotique sur accidents (**INTRA**) par **EDF**, **AREVA** et le **CEA**. **INTRA** dispose en effet d'un parc de robots dérivés de robot "**Centaure**", capables d'intervenir à la place de l'homme.

Mais depuis, les matériels d'intervention ont bien évolué dans tous les domaines. Loin de remplacer l'homme, ils permettent de réduire les risques d'exposition en zone hostile. C'est le cas du bras manipulateur "**Maestro**" et son logiciel de supervision en temps réel. Issu de 20 ans de Recherche et Développement entre le **CEA**, **Cybernetix** et l'**IFREMER**, "**Maestro**" est capable d'emporter dans des zones très radioactives les scies, perceuses, meuleuses ou cisailles nécessaires pour découper in situ des appareils irradiés. Il peut être installé sur un pont roulant, un monte-charge ou un véhicule selon le chantier.

Dans les centrales nucléaires françaises, tout le monde connaît la **MIS**, machine d'inspection en service. Véritable pieuvre d'acier de 12 tonnes et 7 mètres de haut, la **MIS**, commandée à distance par 300 mètres de câbles de fibre optique, scrute en une dizaine de jours chaque centimètre carré de la cuve des réacteurs. Vidéo, ultrasons, radiographie... de ses examens dépend la poursuite du fonctionnement de la cuve.

Imaginé et conçu par **AREVA** de Marcoule et livré au **CEA** en Juillet 2015, le robot "**RIANA**" (**R**obot for **I**vestigations and **A**ssessments of **N**uclear **A**reas) peut intervenir sur tous les sites nucléaires, à l'extérieur comme à l'intérieur. Véritable 4 × 4, il est modulaire et peut donc répondre seul à une diversité de missions, là où plusieurs robots seraient nécessaires : cartographies 2D ou 3D, prélèvement d'échantillons solides et liquides, mesures physiques, mesure de la radioactivité...

"**RIANA**" mesure 77,5 centimètres de long, 54 centimètres de large, 56 centimètres de haut, de poids total de 65 kg et peut se déplacer à une vitesse maximale de 3 mètres par seconde.

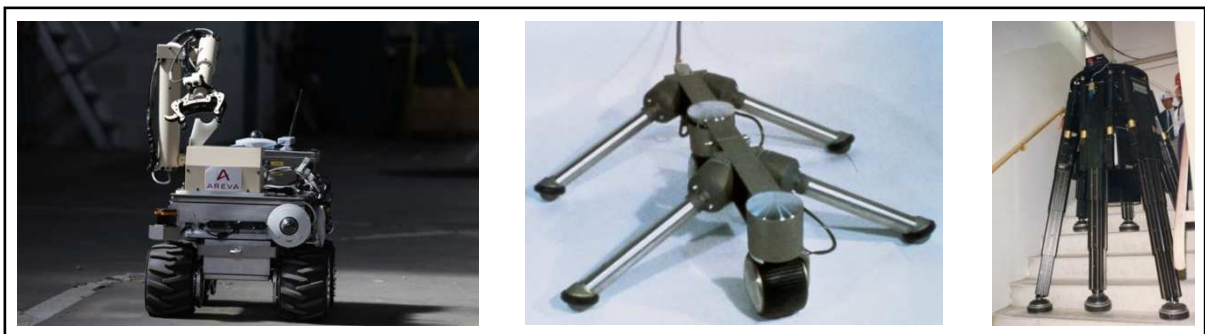


Figure 1.19 : Photos des Robots : "**RIANA**" – 2015 à gauche, "**Meritt**" - 1977 au milieu, et "**Sherpa**" – 1995 à droite

Getinge La Calhene, équipementier spécialisé notamment dans les matériels de protection de l'homme en milieu hostile a développé "**MT200 TAO**", un programme de téléopération assistée par ordinateur qui met à profit de la télémanipulation les travaux des calculateurs rapides et les nouveaux moteurs électriques. Intervenant depuis la fin des années 1970 en milieu nucléaire, Getinge La Calhène a industrialisé avec **AREVA**, cinq (05) systèmes de **TAO** dont un en service depuis 2015 à l'usine de retraitement du combustible de La Hague (Manche).

Un domaine d'application important pour la robotique est celui du démantèlement. C'est notamment grâce aux équipements d'usinage et de soudage conçus et réalisés par **PROTEM** que s'est réalisé le premier et unique démantèlement dans le monde des internes et de la cuve du réacteur refroidi au sodium **KNK II** de Karlsruhe en Allemagne.

Pour que les robots soient efficaces en zone fortement exposée aux radiations, leur électronique est *durcie*, l'instrumentation devant résister aux radiations. **ERMES**, spécialiste en la matière, a développé dans son laboratoire commun avec le **CEA**, des solutions très innovantes en matière de vision (caméras et éclairages LED hautement résistants), mesure (dosimètres, codeurs...), analyse (processeurs résistant aux radiations) et transmission (filaire et sans fil).

En résumé, on a présenté dans ce premier chapitre les différents types des robots mobiles qui sont utilisés à jouer un rôle de plus en plus important dans notre vie mais ceci n'annule pas l'existence de certains problèmes pour assurer une bonne application de ces robots.

Chapitre 2 : Le microcontrôleur 8-bits AVR RISC de l'Atmel® ATmega128L

2.1. Introduction sur le microcontrôleur

Les microcontrôleurs sont très utilisés dans le monde de l'industrie, notamment dans les systèmes embarqués. On pourra donc les retrouver dans l'aéronautique, l'aérospatial, l'automobile, l'électronique grand publique. Leur polyvalence, et leur taille les rendent intéressants pour des modules de traitement de données numériques et aussi analogiques. Ils sont certes peu puissant comparés a des processeurs dédiés, mais ils les compensent par leur prix mais surtout leur taille physique très petite.

Ce deuxième chapitre présente une description généralisée sur le microcontrôleur ATmega128 de la compagnie Atmel [5].

2.1.1. Dates importantes de l'évolution des microcontrôleurs 8-bits

Apparaissant au milieu des années 1980, le microcontrôleur 8-bits a beaucoup évolué jusqu'à aujourd'hui, ceci grâce aux améliorations consécutives des microprocesseurs et des mémoires qui y sont associées. La "*loi de Moore*" prévoit que le nombre de transistors inscriptibles sur une même surface de Silicium double tous les dix huit mois, ce qui a permis d'utiliser des processeurs plus performants dans les microcontrôleurs ou d'en réduire la taille. L'évolution de l' "**EEPROM**" (Electrically Erasable Read Only Memory / Mémoire à lecture seule effaçable électriquement) et l'apparition de la mémoire "**Flash**" qui allie vitesse élevée, durabilité et faible consommation ont également contribuées au développement des microcontrôleurs.

Suivant les utilisations faites du microcontrôleur, le choix entre les concepts **CISC** et **RISC** (VLIW, DSP,...) peut amener une amélioration substantielle.

Un microcontrôleur RISC (Reduced Instruction Set CPU) a un jeu d'instruction réduit (<100 instructions typiquement). Par opposition au microcontrôleur CISC (Complex Instruction Set CPU) qui peut avoir beaucoup plus de 100 instructions.

Les dates importantes de l'évolution des microcontrôleurs 8-bits sont :

- **1946** : Création de l' "**ENIAC**" (Electronic Numerical Integrator and Calculator / Calculateur et intégrateur numérique électronique) par P. Eckert et J. Mauchly. L'"ENIAC" est considéré comme le premier ordinateur, il occupait alors plusieurs salles et ce programmait grâce à des câbles.
- **1947** : Invention du transistor par William Bradford Shockley, Walter H. Brattain et John Bardeen.
- **1948** : Première machine de Von Neumann fonctionnant : la "**Baby**" a été construite à l'université de Manchester.
- **1954** : Premier transistor commercial au Silicium conçu par "Texas Instrument"
- **1958** : Invention du circuit intégré par Jack Kilby chez "Texas Instrument".

- **1968** : Fondation de "Intel".
- **1971** : Création du premier microprocesseur : le "4004" d'Intel, unité de calcul à 4 bits, cadencé à 108 kHz.
- **1984** : Fondation d' "Atmel"
Motorola développe le microcontrôleur MC 68HC11 de 8 bits.
- **1989** : Fondation de "Microchip" et lancement de leur série PIC16C5X.
- **1990** : Premier microcontrôleur PIC de "Microchip" à 8 broches.
- **1995** : Premier microcontrôleur 8-bits RISC d' Atmel à mémoire Flash.
- **2003** : "Microchip" devient le premier fournisseur de microcontrôleurs 8-bits.
- **2004** : Motorola se sépare de sa filiale s'occupant des microcontrôleurs qui devient "Freescale"

2.1.2. Les fabricants principaux des Microcontrôleurs 8-bits

Les fabricants des Microcontrôleurs 8-bits sont:

- **Atmel** : AT; familles AT89Sxxxx, AT90xxxx, ATmegaxxxx...
- **Microchip** : PIC ; familles 12Cxxx, 16Cxxx, 16Fxxx, 18Fxxx...
- **Philips** : P89C51RD2BPN...
- **Motorola** : famille 68HCxxx...
- **Intel** : familles MCS 48, MCS 51...
- **NEC** : familles μ COM 75X et 78K0...
- **SGS - Thomson** : famille ST 6...
- **Texas Instruments** : famille TMS 370...

2.2. Le microcontrôleur AVR ATmega128

2.2.1. Introduction sur ATmega128

Le microcontrôleur **ATmega128** en technologie CMOS de l'Atmel® est un modèle à 8-bits AVR® basé sur l'architecture RISC. ATmega128 prend en charge un débit de 16 MIPS à 16 MHz et fonctionne sous la tension continue entre 4.5 à 5.5V. En exécutant des instructions puissantes dans un cycle d'horloge simple, il réalise des opérations s'approchant de 1 MIPS par MHZ permettant de réaliser des systèmes à faible consommation électrique et simple au niveau électronique.



Figure 2.1 : Photos des microcontrôleurs de la famille Atmel

2.2.2. Définition d'un AVR

AVR est le terme utilisé par la compagnie Atmel® pour désigner le cœur du processeur et la famille de microcontrôleurs qui le mettent en œuvre.

La figure 2.2 ci-dessous montre le diagramme en bloc d'un microcontrôleur AVR

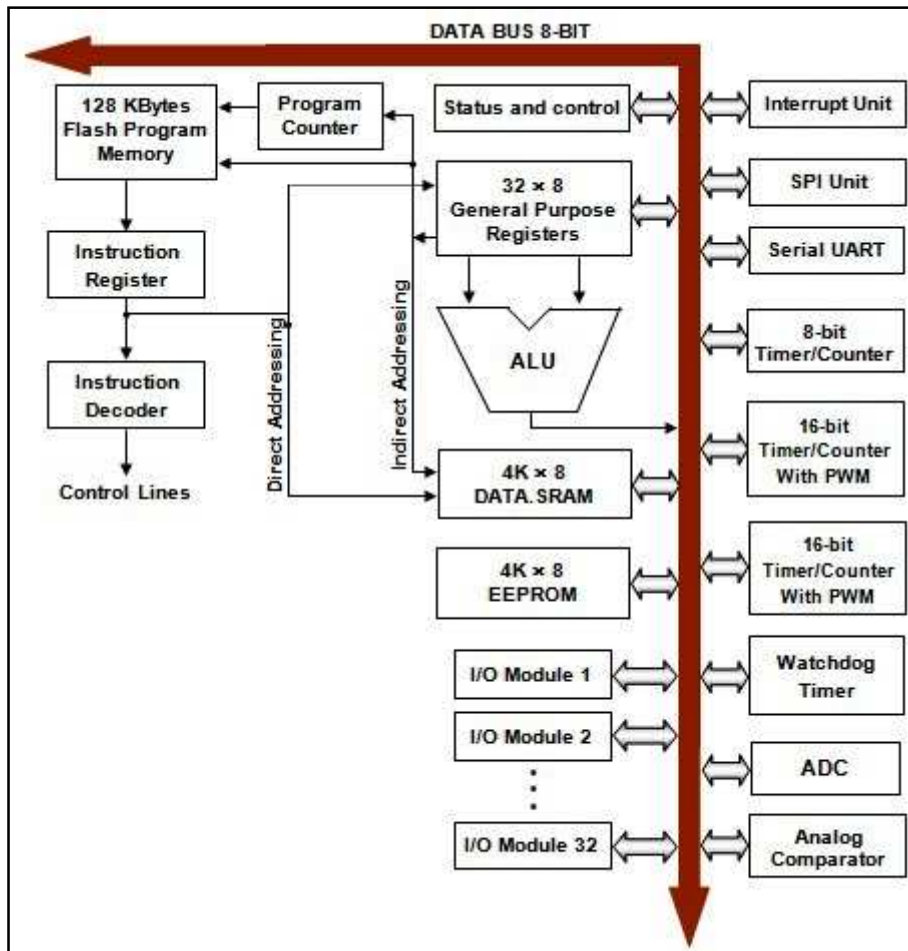


Figure 2.2 : Diagramme en bloc d'un contrôleur AVR

La famille des microcontrôleurs Atmel AVR RISC 8-bit se compose de cinq (05) groupes principaux dont les TinyAVRs, MegaAVRs, XMEGA, AVR spéciaux pour des applications spécifiques (tels que contrôleur USB, CAN, LCD, PWM avancé, etc. ...) et les FPSLIC :

- TinyAVRs

- mémoire programme de 1 à 8 kB
- boîtier de 8 à 32 broches
- nombre de périphériques limité

- MegaAVRs

- mémoire programme de 4 à 256 kB
- boîtier de 28 à 100 broches

- jeu d'instructions plus étendu (*multiplication, instructions pour accès à la mémoire étendue*)
- périphériques plus nombreux

- XMEGA

- mémoire programme de 16 a 384 kB
- boîtier de 44 a 100 broches
- performances étendues, telles que DMA, gestion d'événements entre périphériques, cryptographie intégrée

- AVR spéciaux pour des applications spécifiques

La famille AVR comprend des MegaAVR avec des périphériques tels que :

- contrôleur USB
- contrôleur CAN
- contrôleur LCD
- contrôleur PWM avancé
- contrôleur batterie
- contrôleur pour réseau sans fil **ZigBee**
- **FPSLIC** (Field Programmable System Level Integrated Circuit). Ce circuit est un FPGA avec un cœur AVR qui peut fonctionner jusqu'à 50 MHz, en exécutant son programme en mémoire RAM à la différence des autres familles qui exécutent le programme en mémoire FLASH.

Les microcontrôleurs 8-bit de la famille MegaAVR (ATmega) existent en plusieurs modèles dont certains sont illustrés dans le tableau 2.1 suivant.

Tableau 2.1 : Tableau extrait des modèles de l'ATmega (*établi en 2004*)

Product	Flash (KB)	EEPROM (Bytes)	RAM (Bytes)	I/O	SPI	USART	USI	TWI	PWM	On-Chip Debug		10-bit ADC	LCD	Availability
										JTAG	debugWire			
megaAVR														
ATmega 48	4	256	512	23	1	1	–	1	5	–	Y	8	–	Q4-Q3
ATmega8	8	512	1K	23	1	1	–	1	3	–	–	8	–	Now
ATmega88	8	512	1K	23	1	1	–	1	5	–	Y	8	–	Q4-Q3
ATmega8515	8	512	512	35	1	1	–	–	3	–	–	–	–	Now
ATmega8535	8	512	512	32	1	1	–	1	4	–	–	8	–	Now
ATmega16	16	512	1K	32	1	1	–	1	4	Y	–	8	–	Now
ATmega162	16	512	1K	35	1	2	–	–	6	Y	–	–	–	Now
ATmega168	16	512	1K	23	1	1	–	1	5	–	Y	8	–	Q4-Q3
ATmega32	32	1K	2K	32	1	1	–	1	4	Y	–	8	–	Now
ATmega64	64	2K	4K	53	1	2	–	1	8	Y	–	8	–	Now
ATmega128	128	4K	4K	53	1	2	–	1	8	Y	–	8	–	Now
ATmega256	256	4K	8K	53	1	2	–	1	16	–	Y	8	–	Q1-Q4
LCD AVR														
ATmega169	16	512	1K	53	1	1	Y	–	4	Y	–	8	Y	Now
ATmega329	32	1K	2K	53	1	1	Y	–	4	Y	–	8	Y	Q1-Q4

2.2.3. Les périphériques des Atmel AVR

Généralement, les microcontrôleurs Atmel AVR intègrent des périphériques suivant :

- Mémoire EEPROM (*elle est gérée comme un périphérique*).
- Timers 8 et 16 bits avec "Compare Match" (*interruption lorsqu'une valeur choisie est atteinte*) et mode PWM
- Interface sérielle asynchrone UART/USART (Rx, Tx).
- Interface sérielle synchrone SPI (MISO, MOSI, SCK, SS)
- Interface sérielle TWI [compatible I2C (à 2 fils)]
- Interface sérielle 1-Wire (à 1 fil)
- Ports d'entrées/sorties (PIO) avec résistances de pull-up intégrées
- Oscillateur interne
- Oscillateur séparé pour l'horloge RTC
- Convertisseur Analogique Numérique (ADC) 10 bits
- Comparateur Analogique

Le modèle **ATmega128** qui est l'objet de cette thèse est versatile ; disposant une mémoire **FLASH** de 128 kOctets avec un outil de développement très puissant, il permet de faire évoluer les montages sans problème. Sa programmation est réalisée par une interface **SPI** appelée programmation en circuit.

2.2.4. Caractéristiques de l'ATmega128

ATmega128 fournit les particularités suivantes :

- 01 mémoire **Flash** de 128 Ko (reprogrammable plus de 10.000 dans le système)
- 01 mémoire **EEPROM** de 4 Ko (reprogrammable 100.000 dans le système)
- possibilité de rétention des données dans les mémoires internes de 100 ans à 25°C et 10 ans à 85°C
- 01 mémoire **SRAM** interne de 4 Ko
- 53 lignes ou ports d'entrée/sortie universelles programmables (Port A, B, C, D, E, F & G)
- 32 x 8 registres de travaux d'usage général + registres de contrôle des périphériques (qui dialoguent directement avec l'ALU)
- 01 horloge en temps réel (RTC) avec un oscillateur séparé en quartz
- 02 Timer/Compteurs 8 bit avec diviseurs/multiplicateurs (*prescalers*) séparés et modes comparaison
- 02 Timer/compteurs élargis en 16-bit flexibles avec diviseurs/multiplicateurs (*prescalers*) séparés et mode comparaison, mode capture et interruption
- 01 comparateur analogique (entrée sur Port B)
- 02 canaux de PWM à 8 bits

- 01 Convertisseur Analogique/Numérique **ADC** de 8 canaux à 10 bits
- 01 Chien de Garde (*Watchdog*) programmable avec oscillateur interne
- 02 interfaces série **USART** programmable (séries asynchrones)
- 01 interface série SPI (sélectionnable en mode maître ou esclave) pour programmation dans le système (série synchrone)
- 01 interface I2C pour la gestion d'un bus à 2 fils
- 01 interface JTAG
- 01 bootloader
- 01 interface **LCD** pour piloter directement un écran **LCD** (modèles spéciaux)
- Tension d'alimentation de 4,5 V à 5,5 V pour la version ATmega128
- Température de fonctionnement maximale : 85°C, température de fonctionnement minimale : -40°C
- 133 jeux d'instructions puissantes en majorité exécutées dans un seul cycle d'horloge
- Boîtier : 64 TQFP et 64 MLF

2.2.5. Synoptique de l'architecture interne de l'ATmega128

L'architecture interne de l'ATmega128 est présentée en bloc dans la figure 2.3 ci-dessous.

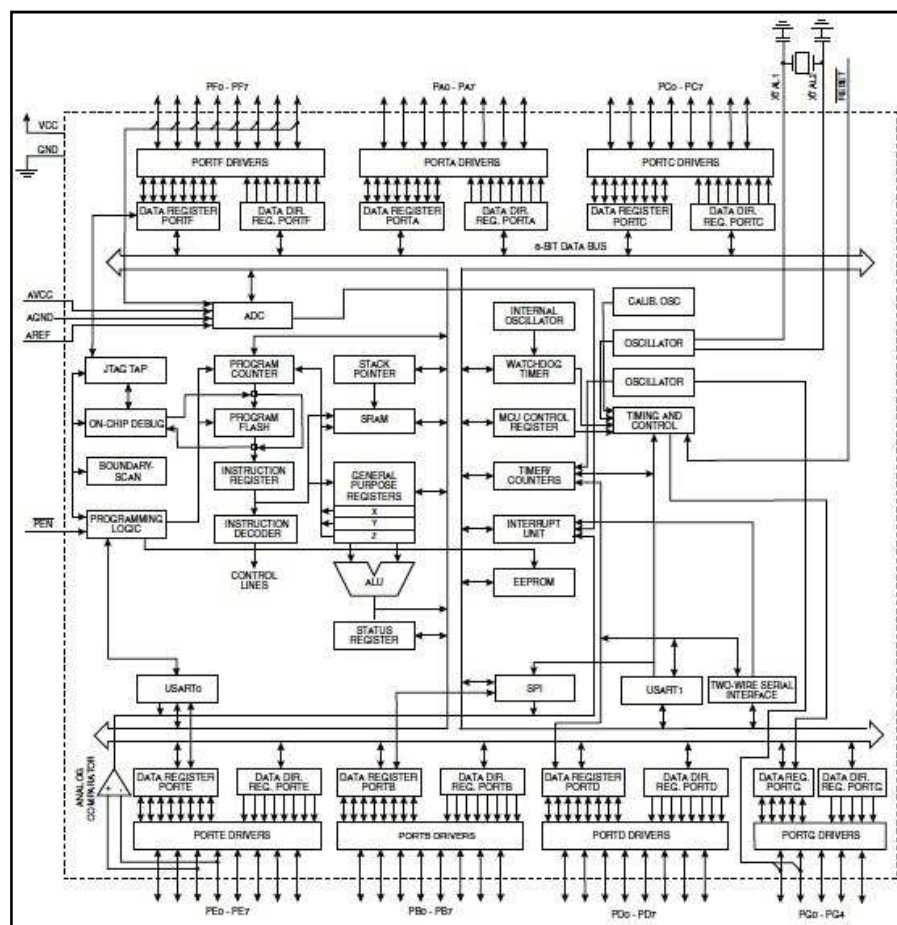


Figure 2.3 : Diagramme en bloc de l'architecture interne de l'ATmega128

2.2.6. Le plan mémoire de l'ATmega128

Trois (03) types de mémoire sont utilisés dans la série de l'ATmega, la mémoire programme **FLASH**, la mémoire de donnée **SRAM** et la mémoire morte de type **EEPROM**.

- La mémoire programme

La mémoire programme permet de stocker et de faire fonctionner le microcontrôleur, il contient de 128 Ko de programme. Le nombre d'écriture sur cette mémoire est approximativement limité à 10.000, largement suffisant pour la majorité des applications. La figure donne l'adressage de la mémoire **FLASH** du modèle **ATmega128**.

- La mémoire de donnée

La mémoire de donnée contient les 32 registres de travail, les 64 registres de commande et la mémoire **SRAM** pour les variables du programme de 4096 octets (4 Ko) pour le modèle **ATmega128**. La figure présente les relations entre espace physique et registre.

- La mémoire morte

La mémoire morte est de type **EEPROM** d'accès plus complexe contiendra la configuration du programme et les données importantes qui seront sauvées pendant l'absence de courant électrique. On peut écrire jusqu'à 100.000 fois dans l'**EEPROM**. La taille de l'**EEPROM** pour le microcontrôleur ATmega128 est de 4 Ko.

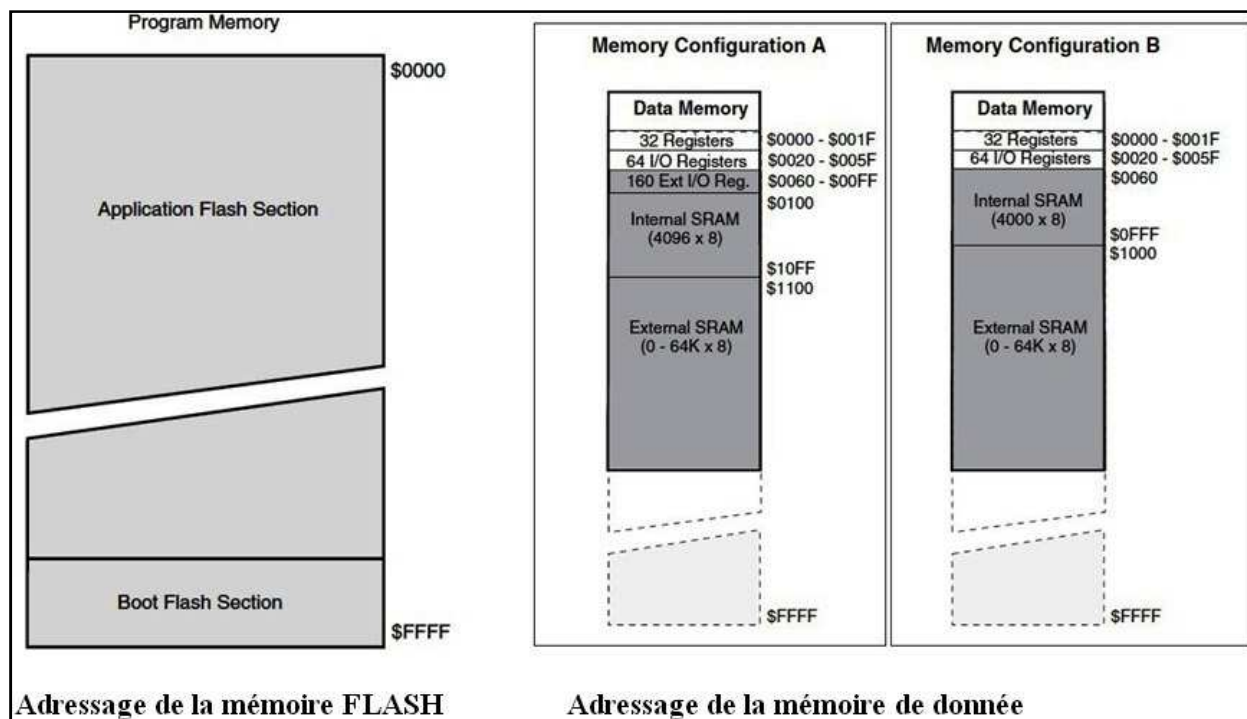


Figure 2.4 : Plan mémoire interne de l'ATmega128

Le plan mémoire externe de l’ATmega128 est représenté dans la figure 2.5 ci-dessous.

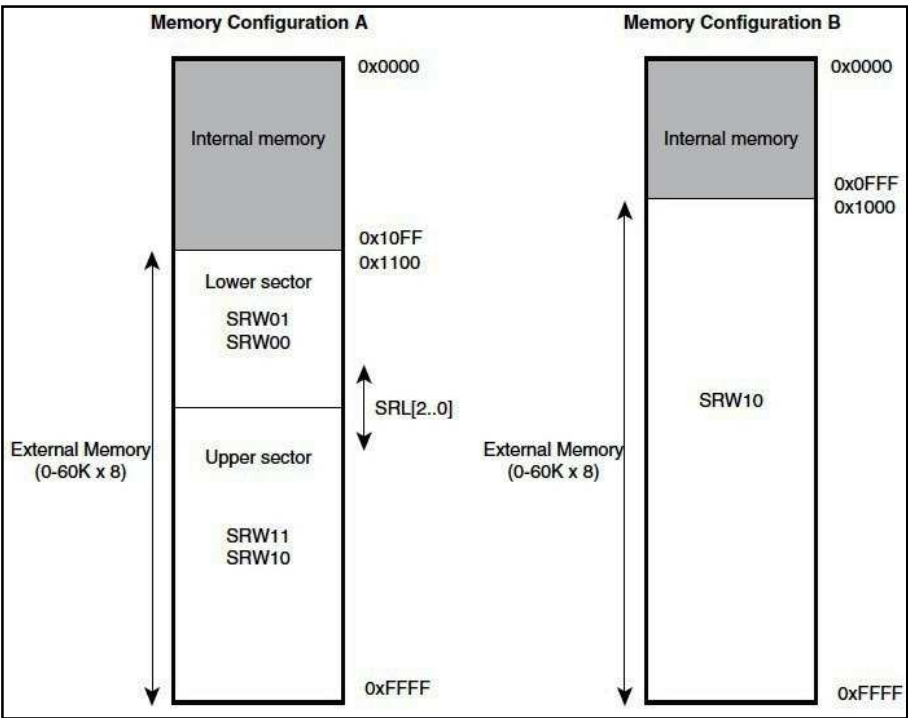


Figure 2.5 : Plan mémoire externe de l’ATmega128

2.2.8. Les Registres dans l’ATmega128

Les 32 registres dans ATmega128 sont détaillés dans la figure 10 qui suit avec l’adresse effective dans la mémoire **SRAM**.

	7	0	Addr.	
General Purpose Working Registers	R0		\$00	
	R1		\$01	
	R2		\$02	
	...			
	R13		\$0D	
	R14		\$0E	
	R15		\$0F	
	R16		\$10	
	R17		\$11	
	...			
	R26		\$1A	X-register Low Byte
	R27		\$1B	X-register High Byte
	R28		\$1C	Y-register Low Byte
	R29		\$1D	Y-register High Byte
	R30		\$1E	Z-register Low Byte
	R31		\$1F	Z-register High Byte

Figure 2.6 : Structure des 32 registres dans le CPU de l’ATmega128

La gamme **ATmega** peut contenir 66 Registres selon le composant dont deux (02) sont communs à d’autres registres. Ces registres sont dressés dans les 02 tableaux suivants.

Tableau 2.2 : Liste des 66 registres existant dans la gamme **ATmega**

Catégorie	Désignation	Registre	Adresse
Interface deux fils I2C (TWI)	Contrôle du Bus	TWBR	\$00
	Etat (<i>Status</i>)	TWSR	\$01
	Adresse	TWAR	\$02
	Données à transmettre ou reçus	TWDR	\$03
Convertisseur analogique	Poids Faible de résultat	ADCL	\$04
	Poids fort de résultat	ADCH	\$05
	Contrôle et Etat	ADCSR	\$06
	Sélection de la voie à échantillonner	ADMUX	\$07
Comparateur analogique	Contrôle et Etat du Comparateur	ACSR	\$08
USART	Vitesse de communications (Bauds)	UBRR	\$09
	Contrôle	UCR	\$0A
	Etat (<i>Statut</i>)	USR	\$0B
	I/O donnée	UDR	\$0C
SPI	Contrôle	SPCR	\$0D
	Etat (<i>Statut</i>)	SPSR	\$0E
	I/O donnée	SPDR	\$0F
Port parallèle D	Adresse des broches (Pin)	PIND	\$10
	Direction des broches	DDRD	\$11
	Données des broches	PORTD	\$12
Port parallèle C	Adresse des broches (Pin)	PINC	\$13
	Direction des broches	DDRC	\$14
	Données des broches	PORTC	\$15
Port parallèle B	Adresse des broches (Pin)	PINB	\$16
	Direction des broches	DDRB	\$17
	Données des broches	PORTB	\$18
Port parallèle A	Adresse des broches (Pin)	PINA	\$19
	Direction des broches	DDRA	\$1A
	Données des broches	PORTA	\$1B
EEPROM	Contrôle	EECR	\$1C
	Donnée	EEDR	\$1D
	Poids faible adresse	EEARL	\$1E
	Poids Fort adresse	EEARH	\$1F
USART	Vitesse de communications (Bauds)	UBRRH/UCSRC	\$20
Watchdog	Chien de Garde	WDTCR	\$21
Timer / compteur 2 (8 bits)	Etat du mode asynchrone	ASSR	\$22
	Comparaison	OCR2	\$23
	Compteur	TCNT2	\$24
	Contrôle	TCCR2	\$25

Tableau 2.3 : Suite de la liste des 66 registres existant dans la gamme ATmega

Catégorie	Désignation	Registre	Adresse
Timer / compteur 1 (16 bits)	Entrée poids faible de capture	ICR1L	\$26
	Entrée poids fort de capture	ICR1H	\$27
	Timer B sortie comparaison poids faible	OCR1BL	\$28
	Timer B sortie comparaison poids fort	OCR1BH	\$29
	Timer A sortie comparaison poids faible	OCR1AL	\$2A
	Timer A sortie comparaison poids fort	OCR1AH	\$2B
	Timer/compteur 1 poids Faible	TCNT1L	\$2C
	Timer/compteur 1 poids Fort	TCNT1H	\$2D
Port I/O Oscillateur	Contrôle Timer/compteur 1 poids Faible	TCCR1B	\$2E
	Contrôle Timer/compteur 1 poids Fort	TCCR1A	\$2F
	Registre Spéciale des fonctions I/O	SFIO	\$30
	Calibration d'Oscillateur	OSCCAL/OCDR	\$31
Timer / compteur 0 (8 bits)	Timer/compteur 0	TCNT0	\$32
	Contrôle Timer/compteur 0	TCCR0	\$33
MCU	Statuts Général	MCUSR	\$34
	Contrôle Général	MCUCR	\$35
Interface I2C (TWI)	Contrôle Général	TWCR	\$36
MCU 'Boot Loader'	Contrôle mémoire programme	SPMCR	\$37
Interruptions	Drapeau d'interruption Compteur/Timer	TIFR	\$38
	Masque d'interruption Compteur/Timer	TIMSK	\$39
	Drapeau d'interruption Généraux	GIFR	\$3A
	Masque d'interruption Généraux	GICR	\$3B
	Timer/compteur comparaison en Sortie	OCR0	\$3C
Pointeur de pile	Pointeur de pile poids faible	SPL	\$3D
	Pointeur de pile poids fort	SPH	\$3E
Registre SREG	Registre d'Etat et de Statut	SREG	\$3F

2.2.9. Classement des Registres dans ATmega128

a). Les Registres systèmes

Les registres systèmes permettent de programmer le microcontrôleur selon le choix d'utilisation que le programmeur veut en faire. Ils sont aux nombres de quatre (04), mais seuls les deux (02) premiers sont importants :

- Le Registre MCUCR (*MCU Control Register*)

C'est le registre de contrôle de l'unité centrale du microcontrôleur. Ce registre détermine le fonctionnement en mode sommeil et la gestion des interruptions externe 0 et 1.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$35	SE	SM2	SM1	SM0	ISC11	ISC10	ISC01	ISC00
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

Avec : - **SE** (*Sleep Enable*), le bit de mise en sommeil de l'unité centrale

- **SM2, 1, 0** (*Sleep Mode*), les bits de choix du mode sommeil (arrêt ou ralentie)

- **ISC11, ISC10** (*Interrupt Sense Control*), les bits de Control, définition de prise en compte de l'interruption externe **INT1**

- **ISC01, ISC00** (*Interrupt Sense Control*), les bits de Control, définition de prise en compte de l'interruption externe **INT0**

- Le Registre MCUSR (*MCU Control and Status*)

Ce registre permet de connaître le statut du microcontrôleur, comme de déterminer la source d'un reset.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$34	JTD	ISC2	-	JTRF	WDRF	BORF	EXTRF	PORF
L/E	L/E	L/E	L	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

Avec : - **JTD** (*JTAG Interface Disable*), l'interface **JTAG** est active si ce bit est à 0 avec le bit **JTAGEN** à 1. Si ce bit est à 1 La programmation de la mémoire Flash de l'ATmega se fait par l'interface JTAG.

- **ISC2** (*Interrupt Sense Control 2*), ce bit est activé par la broche externe **INT2** si le registre **SREG** est activé pour les interruptions (**I** = 1).

- **JTRF** (*JTAG Reset Flag*), Ce bit est mis à 1 si un Reset est causé par la logique **JTAG** du Registre Reset choisi par l'instruction **JTAG AVR_RESET**. Ce bit est remis à 1 lors de la mise sous tension, ou en écrivant un 0 dedans.

- **WDRF** (*Watchdog Reset Flag*) est mis à 1 pour activer le chien de garde. Ce bit est remis à 0 par un Reset ou par l'écriture d'un 0.

- **BORF** (*Brown-Out Reset Flag*) est mis à 1 si une panne d'électricité partielle arrive. Ce bit est remis par un Reset ou par l'écriture d'un 0.

- **EXTRF & PORF** (*External Reset Flag & Power-On Reset Flag*), ces 2 bits déterminent la source d'un **RESET**.

- Le Registre OSCCAL (*Oscillator Calibration Register*)

C'est le registre de calibrage de l'oscillateur pour la programmation de la mémoire **FLASH** et l'**EEPROM**. Les valeurs par défaut conviennent pour la majorité des applications.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$31	CAL7	CAL6	CAL5	CAL4	CAL3	CAL2	CAL1	CAL0
L/E	L/E	L/E	L	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

- Le Registre SPMCR (*Store Program Memory Control Register*)

C'est le registre de contrôle de sauvegarde de la mémoire de programme (**SPM**) qui contient les bits pour contrôler les opérations de chargement des programmes dans la mémoire **FLASH** en mode "Boot

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$37	SPMIE	RWWSB	-	RWWSRE	BLBSET	PGWRT	PGERS	SPMEM
L/E	L/E	L/E	L	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

Avec : - **SPMIE** (*SPM Interrupt Enable*) Quand le bit est écrit à 1 et le bit **I** de **SREG** est mis à 1, le **SPM** est prêt à prendre les interruptions. L'interruption **SPM** est exécutée tant que le bit **SPMEN** est à 0.

- **RWWSB** (*Read-While-Write Section Busy*) sera mis à 1 par le matériel quand l'auto programmation (*page effacée ou page écrite*) de la section **RWW** est initialisée.

- **RWWSRE** (*Read-While-Write Section Read Enable*), l'écriture dans ce bit échouera l'opération de chargement de la mémoire **FLASH** et les données chargées seront perdues.

- **BLBSET** (*Boot Lock Bit Set*) sera automatiquement remis à 0 à l'achèvement de l'instruction ou si aucune instruction **SPM** n'est exécutée dans les quatre (04) cycles d'horloge.

- **PGWRT** (*Page Write*)

- **PGERS** (*Page Erase*)

- **SPMEN** (*Store Program Memory Enable*)

b). Les Registres d'Etat et de Pile

Deux (02) registres sont indispensables au système pour fonctionner, le registre d'état **SREG** et le registre de gestion de la pile pour les interruptions et la gestion des sous-programmes.

- Le Registre SREG (*Status Register*)

Ce registre d'état sert principalement avec les fonctions arithmétiques et logiques pour les opérations de branchements. Il indique et autorise aussi le fonctionnement des interruptions. Il est modifié par le résultat des manipulations mathématiques et logiques. C'est le principal registre qui sert à effectuer les branchements conditionnels après une opération arithmétique ou logique. Il peut être lu et écrit à tout moment sans aucune restriction.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$3F	I	T	H	S	V	N	Z	C
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

- Le Registre Pointeur de pile (*Stack Pointer*)

Ce registre est utilisé par les instructions **PUSH** et **POP** de gestion de pile. La gestion de pile utilise les deux registres 8 bits qui suivent pour former une adresse 16 bit :

Adresse	15	14	13	12	11	10	9	8
\$3D	SP15	SP14	SP13	SP12	SP11	SP10	SP9	SP8
Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$3E	SP7	SP6	SP5	SP4	SP3	SP2	SP1	SP0

L'adresse ainsi créée doit être positionné en général en fin de la mémoire **SRAM**. La pile est décrémenté avec l'instruction **PUSH** et incrémenté avec **POP**, donc le positionnement en fin de **SRAM**.

2.3. Présentation physique de l'ATmega128L

L'ATmega128 se présente physiquement sous la forme d'un circuit intégré à 64 broches en boîtier TQFP/MLF illustré dans la figure 2.7 ci-dessous.

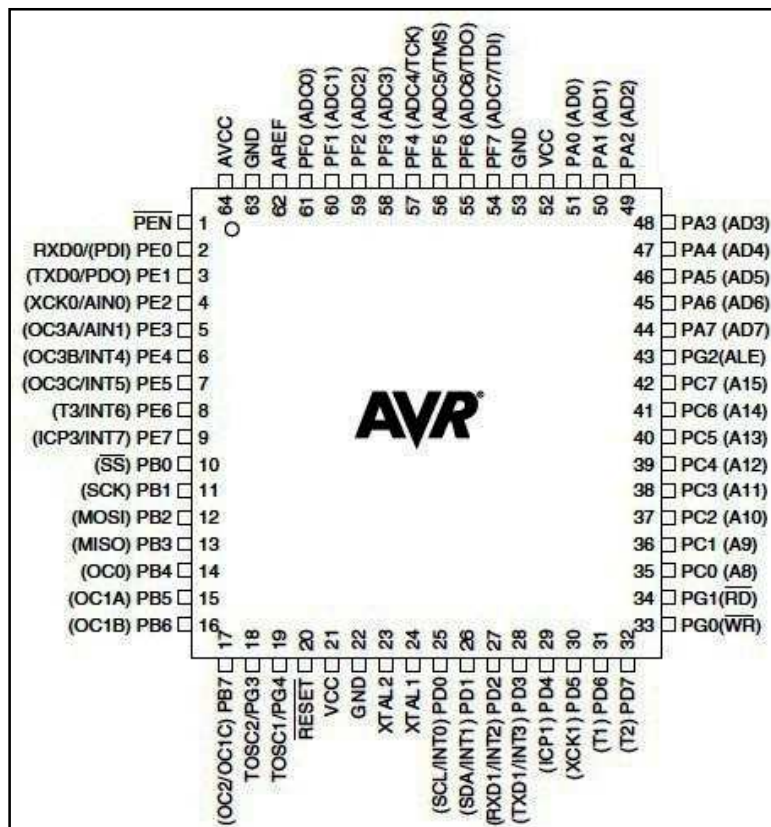


Figure 2.7 : Brochage du circuit intégré ATmega128L en boîtier PLCC/ TQFP/MLF

2.4. Description des broches de l'ATmega128L

- **VCC** : broche d'alimentation numérique du microcontrôleur (+2,7 à +5V)

- **GND** : masse de l'alimentation
- **Port A (PA7..PA0)** : Port A peut être utilisé comme un port d'entrée-sortie à 8 bits bidirectionnel avec des résistances internes de tirage (choisi pour chaque bit). Port A assure aussi une fonction alternative comme port d'adresse bas [*low byte address* PA0 : AD0, PA1 : AD1..PA6 : AD6, PA7 : AD7] pour l'interfaçage de la Mémoire externe
- **Port B (PB7..PB0)** : Port B peut être utilisé comme un port d'entrée-sortie à 8 bits bidirectionnel avec des résistances internes de tirage (choisi pour chaque bit). On l'utilise aussi pour la programmation **SPI** [PB0 : SS, PB1 : SCK, PB2 : MOSI, PB3 : MISO], comme ports de sortie PWM / comparateur analogique [PB4 : OC0, PB5 : OC1A, PB6 : OC1B, PB7 : (OC2/OC1C)]
- **Port C (PC7..PC0)** : Port C peut être utilisé comme un port d'entrée-sortie à 8 bits bidirectionnel avec des résistances internes de tirage (choisi pour chaque bit). Port C assure aussi une fonction alternative comme port d'adresse haut [*high byte address* PC0 : AD8, PC1 : AD9..PC6 : AD14, PC7 : AD15] pour l'interfaçage de la Mémoire externe
- **Port D (PD7..PD0)** : Port D peut être utilisé comme un port d'entrée-sortie à 8 bits bidirectionnel avec des résistances internes de tirage (choisi pour chaque bit). On l'utilise aussi comme 2^{ème} port de communication série **USART** [PD3 : (INT3/TXD1), PD2 : (INT2/RXD1), PD5 : XCK1], d'interfaçage **TWI** ou d'entrées pour les interruptions externes [PD0 : (INT0/SCL), PD1 : (INT1/SDA)] ou d'entrées pour comptage des événements externes [(PD6 : T1), PD7 : T2]
- **Port E (PE7..PE0)** : Port E peut être utilisé comme un port d'entrée-sortie à 8 bits bidirectionnel avec des résistances internes de tirage (choisi pour chaque bit). On l'utilise aussi comme 1^{er} port de communication série **USART** [PE1 : (PDO/TXD0), PE0 : (PDI/RXD0)], d'entrées pour les interruptions externes [PE2 : AIN0/XCK0, PE3 : (AIN1/OC3A), PE4 : (INT4/OC3B), PE5 : (INT5/OC3C), PE6 : (INT6/T3), PE7 : (INT7/ICP3)] ou de comparateur analogique
- **Port F (PF7..PF0)** : Port F est le port d'entrée du Convertisseur Analogique Numérique [(PF0 : ADC0),..., (PF7 : ADC7)]. Il peut être utilisé aussi comme un port d'entrée-sortie à 8 bits bidirectionnel avec des résistances internes de tirage (choisi pour chaque bit) lorsque le Convertisseur Analogique Numérique n'est pas utilisé. Il est aussi utilisé comme broches de fonctions de l'interface **JTAG** [PF7 : TDI, PF6 : TD0, PF5 : TMS, PF4 : TCK].
- **Port G (PG4..PG0)** : Port G est un port d'entrée-sortie à 5 bits bidirectionnel avec des résistances internes de tirage (choisi pour chaque bit). Il sert aussi comme oscillateur pour le Timer/Compteur [PG3 : TOSC2, PG4 : TOSC1]. On l'utilise aussi comme Signaux de lecture et d'écriture de la mémoire externe [PG0 : /WR, PG1 : /RD]
- **/RESET** : RESET est une broche d'entrée, déclenchée par un front descendant maintenue plus de 50 ns il produira le Reset du microcontrôleur, même si l'horloge ne court pas
- **XTAL1** : XTAL1 est la broche d'entrée de l'oscillateur externe ou libre pour l'horloge interne
- **XTAL2** : XTAL2 est une broche de production de l'amplificateur d'oscillateur

- **AVCC** : AVCC est une broche de tension d'alimentation pour le Convertisseur Analogique Numérique (ADC) qui doit être connectée à **VCC** via un filtre passe-bas pour éviter les parasites
- **AREF** : AREF est l'entrée de référence analogue pour le Convertisseur Analogique Numérique (ADC) avec une tension dans la gamme de **2 V** à **AVCC** avec filtre passe bas
- **/PEN** : PEN est une broche d'autorisation en de programmation du microcontrôleur en mode SPI.

2.5. Architecture interne de l'ATmega128

Le cœur AVR combine un jeu de 131 instructions riches avec 32 registres spéciaux travaillant directement avec l'Unité Arithmétique et Logique ALU, qui représente le registre d'accumulateur A (B ou D) dans les microcontrôleurs classiques.

Ces registres spéciaux permettent à deux registres indépendants d'être en accès directs par l'intermédiaire d'une simple instruction et exécutée sur un seul cycle d'horloge. Cela signifie que pendant un cycle d'horloge simple l'Unité Arithmétique et Logique ALU exécute l'opération et le résultat est stocké en arrière dans le registre de sortie, le tout dans un cycle d'horloge. L'architecture résultante est plus efficace en réalisant des opérations jusqu'à dix (10) fois plus rapidement qu'avec des microcontrôleurs conventionnels CISC.

Les registres spéciaux sont dit aussi registre d'accès rapide et 6 des 32 registres peuvent être employés comme trois (03) registres d'adresse de 16 bits pour l'adressage indirects d'espace de données (X, Y & Z). Le troisième (03) Z est aussi employé comme indicateur d'adresse pour la fonction de consultation de table des constantes.

Les informations sont diffusées par un bus de donnée à 8 bits dans l'ensemble du circuit.

Le microcontrôleur possède aussi un mode sommeil qui arrête l'unité centrale en permettant à la SRAM, les Timer/Compteurs, l'interface SPI d'interrompre la veille du système pour reprendre le fonctionnement.

Lors de l'arrêt de l'énergie électrique, le mode économie sauve le contenu des registres et gèle l'oscillateur, mettant hors de service toutes autres fonctions du circuit avant qu'une éventuelle interruption logicielle ou matérielle soit émise.

Dans le mode économie, l'oscillateur du minuteur continue à courir, permettant à l'utilisateur d'entretenir le minuteur RTC tandis que le reste du dispositif dort.

Le dispositif est fabriqué en employant la technologie de mémoire à haute densité non volatile d'Atmel. La mémoire Flash est reprogrammable par le système avec l'interface SPI ou par un programmeur de mémoire conventionnel non volatile.

2.6. Les éléments de base de l'ATmega128

2.6.1. L'Horloge Système

Le choix du type d'horloge est déterminé lors de la programmation de la mémoire **FLASH** du microcontrôleur et peut être choisi parmi les données du tableau 2.4 suivant.

Tableau 2.4 : Tableau sur les types et option d'horloge système d'AVR ATmega

Dispositif d'Option d'horloge	CKSEL3, 2, 1 & 0
Résonateur Externe Cristal/Céramique	1111 - 1010
Cristal Basse Fréquence Externe	1001
Oscillateur Externe à RC	1000 - 0101
Oscillateur Calibré Interne à RC	0100 - 0001
Horloge Externe	0000

L'oscillateur à quartz externe est connecté sur **XTAL1** et **XTAL2** comme le montre la figure suivante pour cadencer le microcontrôleur. La fréquence du quartz est de 4 à 16 **MHz** de type cristal ou un résonateur céramique.

- L'horloge Interne :

Pour conduire un dispositif externe avec la source d'horloge interne, **XTAL2** doit être laissée en l'air, tandis que l'on connecte **XTAL1** au dispositif à piloter.

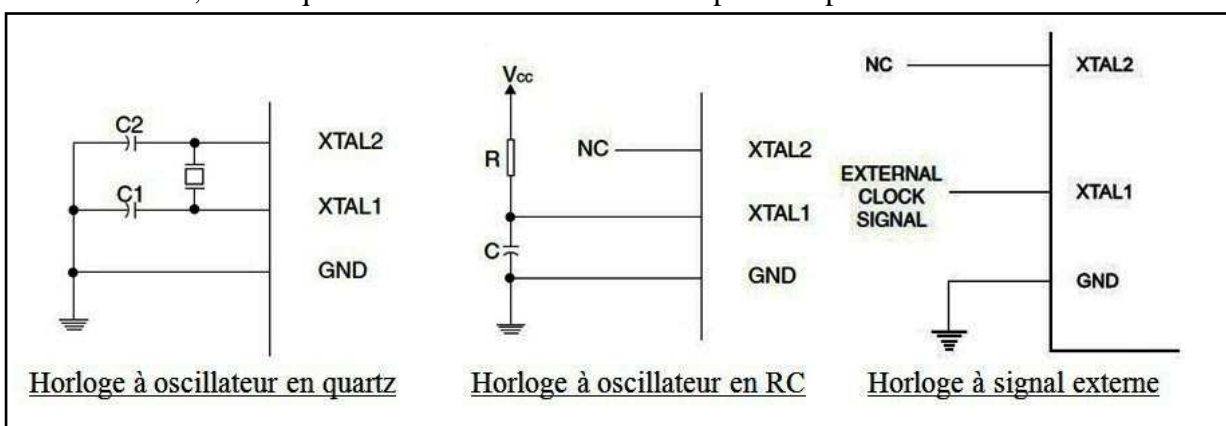


Figure 2.8 : Les trois (03) types de configuration de l'horloge dans un circuit à ATmega

- L'oscillateur du Timer :

Pour l'oscillateur du Timer en temps réel, les broches **TOSC1** et **TOSC2** (**PG4** & **PG3**) peuvent recevoir un cristal de **32 768 Hz** directement connecté entre ces broches sans condensateur externe. L'application d'une source d'horloge externe sur **TOSC1** n'est pas recommandée. Ce système permet de cadencer le Timer avec des valeurs de temps en sous-multiple de la seconde.

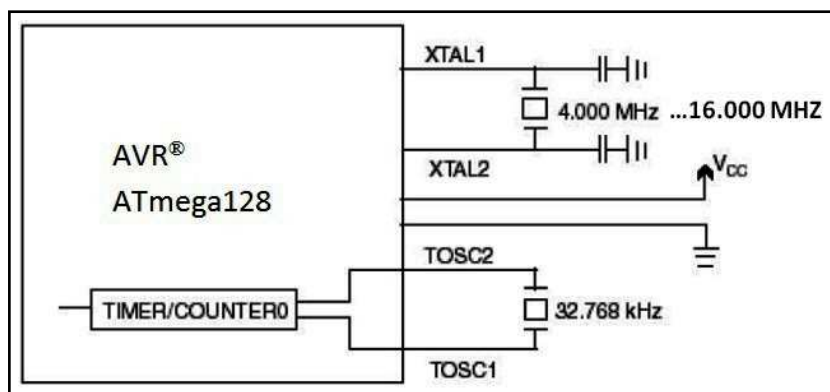


Figure 2.9 : Synoptique de connexion d'horloge Temps Réel

2.6.2. Le Chien de Garde ou Watchdog (WDT)

Le chien de garde ou Watchdog, est un compteur qui permet de palier au blocage du microcontrôleur. Ce blocage peut être d'ordre logiciel (*retour impossible, mis en boucle infinie ou tout simplement erreur de structuration*), soit matériel (*parasites, chute de tensions*) ; dans les deux cas, le blocage du programme peut avoir des conséquences très embêtantes.

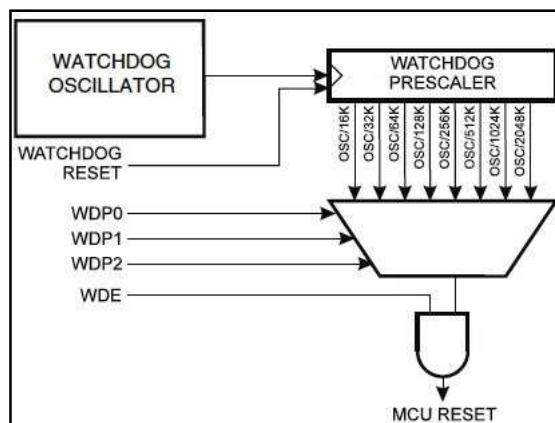


Figure 2.10 : Synoptique du prédiviseur du Watchdog

La source d'horloge du Watchdog Timer est indépendante du quartz du microcontrôleur, mais pas de l'alimentation. La fréquence de fonctionnement est de 1 **MHz** pour une tension d'alimentation de 5 V et 350 **KHz** pour 3 V.

Le compteur part de 0, incrémente de 1 à chaque top d'horloge et revient à 0 après la valeur 255 et on recommence, tout débordement du compteur (255 → 0) génère un Reset automatique.

- **Le Registre WDCTR (Watchdog)**

C'est le registre de contrôle du Watchdog. La mise en marche du Watchdog doit se faire le plutôt possible. L'instruction **WDR** devrait se placer de manière à assurer un déroulement correct du programme. Attention aussi devrait se faire aux temporisations, boucles d'attente de conditions et les interruptions.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$41	-	-	-	WDTOE	WDE	WDP2	WDP1	WDP0
L/E	L	L	L	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

Les bits 7, 6 et 5 sont inutilisés dans la gamme de ATmega avec :

- **WDTOE (Watchdog Trun-On Enable)** est le bit de sécurité d'arrêt du chien de garde. Une sécurité logicielle permet de ne pas l'arrêter accidentellement. Il faut respecter la procédure suivante : **WDTOE** = 1, puis aussitôt, **WDE** = 0. Si l'opération n'est pas effectuée dans les 4 prochains cycles d'horloge, ce bit repasse automatiquement à 0.
- **WDE (Watchdog Enable)** est le bit pour Marche/Arrêt du Watchdog. La désactivation de ce bit n'est possible qu'avec la procédure précédente.

- **WDP2, 1, 0** (*Watchdog Timer Prescaler2, 1, 0*) est le bit de sélection du facteur de prédivison du signal d'horloge pour définir l'intervalle maximum de temps pour la remise à 0 **RAZ**.

2.6.3. Les interruptions

Pour que le microcontrôleur ne passe pas la majorité de son temps à attendre une condition qu'on aurait programmée, les constructeurs ont mis au point les interruptions. Il s'agit d'avertir le microcontrôleur qu'une condition est remplie et qu'il faut immédiatement la traiter. Pratiquement, chaque périphérique interne dispose d'une source d'interruption.

- Reset et Vecteurs d'interruption pour ATmega128

AVR ATmega128 fournit 35 sources de l'interruption différentes classées en priorité par ordre décroissant d'important dans les 02 tableaux 2.5 et 2.6 suivants.

Tableau 2.5 : Classement des vecteurs d'interruptions de l'ATmega128

Vecteur N°	Adresse / programme	Source / programme	Définition de la source de l'interruption
1	\$0000	RESET	Reset Externe, début d'alimentation, Reset Erreur d'alimentation, Reset Watchdog et Reset JTAG AVR
2	\$0002	INT0	External Interrupt Request0
3	\$0004	INT1	External Interrupt Request1
4	\$0006	INT2	External Interrupt Request2
5	\$0008	INT3	External Interrupt Request3
6	\$000A	INT4	External Interrupt Request4
7	\$000C	INT5	External Interrupt Request5
8	\$000E	INT6	External Interrupt Request6
9	\$0010	INT7	External Interrupt Request7
10	\$0012	TIMER2 COMP	Timer/Counter2 Compare Match
11	\$0014	TIMER2 OVF	Timer/Counter2 Overflow
12	\$0018	TIMER1 CAPT	Timer/Counter1 Capture Event
13	\$0018	TIMER1 COMPA	Timer/Counter1 Compare Match A
14	\$001A	TIMER1 COMPB	Timer/Counter1 Compare Match B
15	\$001C	TIMER1 OVF	Timer/Counter1 Overflow
16	\$001E	TIMER0 COMP	Timer/Counter0 Compare Match
17	\$0020	TIMER0 OVF	Timer/Counter0 Overflow
18	\$0022	SPI,STC	SPI Serial Transfer Complete
19	\$0024	USART0, RX	USART0, Rx Complete
20	\$0026	USART0, UDRE	USART0 Data Register Empty

Tableau 2.6 : Suite de classement des vecteurs d'interruptions de l'ATmega128

Vecteur N°	Adresse / programme	Source / programme	Définition de la source de l'interruption
21	\$0028	USART0, TX	USART0, Tx complete
22	\$002A	ADC	ADC Conversion Complete
23	\$002C	EE READY	EEPROM Ready
24	\$002E	ANALOG COMP	Analog Comparator
25	\$0030	TIMER1 COMPC	Timer/Counter1 Compare Match C
26	\$0032	TIMER3 CAPT	Timer/Counter3 Capture Event
27	\$0034	TIMER3 COMPA	Timer/Counter3 Compare Match C
28	\$0036	TIMER3 COMPB	Timer/Counter3 Compare Match C
29	\$0038	TIMER3 COMPC	Timer/Counter3 Compare Match C
30	\$003A	TIMER3 OVF	Timer/Counter3 Overflow
31	\$003C	USART1, RX	USART1, Rx Complete
32	\$003E	USART1, UDRE	USART1 Data Register Empty
33	\$0040	USART1, TX	USART1, Tx Complete
34	\$0042	TWI	Two-wire Serial Interface
35	\$0044	SPM READY	Store Program Memory Ready

- Registres d'Interruption de l'ATmega128

Quatre (04) registres d'interruption existent dans l'ATmega128 :

- Le Registre **GICR** (*General Interrupt Control Register*)
- Le Registre **GIFR** (*General Interrupt Flag Register*)
- Le Registre **TIFR** (*Timer/Counter Interrupt Flag*)
- Le Registre **TIMSK** (*Timer/Counter Interrupt Mask*)

- Le Registre GICR (*General Interrupt Control Register*)

Le registre **GICR** contrôle l'activation des interruptions externes et le déplacement de la table des vecteurs d'interruption dans la mémoire. Le registre **GIFR** permet de connaître l'auteur de l'interruption **INTx**.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$3B	INT1	INT0	INT2	-	-	-	IVSEL	IVCE
L/E	L/E	L/E	L/E	L	L	L	L/E	L/E

Les deux (02) premiers bits (0 & 1) sont réservés à des applications spéciales et complexes du microcontrôleur ATmega128. Les bits 2, 3 et 4 ne sont pas utilisés (lu à 0).

- **INT1, 0, External Interrupt Request 1 ou 0 Enable** : L'interruption externe est activée si ce bit est mis à 1. Les bits **ISC11** et **ISC10** dans le registre de contrôle

MCUCR définit si le déclenchement se fait sur un front montant ou descendant, même si le port est configuré en sortie.

- **INT2, External Interrupt Request 2 Enable** : L'interruption externe est activée Si ce bit est mis à 1. Le bit **ISC2** dans le registre de contrôle **MCUCSR** définit si le déclenchement se fait sur un front montant ou descendant, même si le port est configuré en sortie.

- **IVSEL Interrupt Vector Select** : Quand ce bit est à 0, les vecteurs d'interruption sont placés au début de la mémoire **FLASH**. Quand ce bit est mis à 1, les vecteurs d'interruption sont déplacés au début de la section du "Boot Loader" de la mémoire **FLASH**.

- **IVCE Interrupt Vector Change Enable** : Le bit **IVCE** doit être écrit à 1 pour permettre le changement du bit **IVSEL**. C'est une protection pour éviter de bloquer le microcontrôleur. **IVCE** est remis à 0 par le système quatre cycles d'horloge après sa modification ou quand **IVSEL** est écrit.

- Le Registre **GIFR** (*General Interrupt Flag Register*)

Le registre **GIFR** indique l'état des interruptions externes des broches **PD2 (INT0)**, **PD3 (INT1)** et **PB2 (INT2)**.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$3A	INTF1	INTF0	INTF2	-	-	-	-	-
L/E	L/E	L/E	L/E	L	L	L	L	L

Les cinq premiers bits (0 à 4) ne sont pas utilisés (lu à 0).

- **INTF1, 0 External Interrupt Flag 1 ou 0** : Quand un changement d'état apparaît sur la broche **INT1** (ou **INT0**) il déclenche une interruption et **INTF1** (ou **INTF0**) est mis à 1 si le bit dans **SREG** et le bit **INT1** (ou **INT0**) dans **GICR** est à un. Le microcontrôleur ATmega128 sautera au vecteur d'interruption. Le drapeau est remis à 0 quand la routine d'interruption est exécutée. Le bit peut être remis à 0 par le programme avant la fin de la routine d'interruption. Ce drapeau est toujours remis à 0 quand **INT1** (ou **INT0**) est configuré en entrée d'interruption.

- **INTF2 External Interrupt Flag 2** : Quand un changement d'état sur la broche d'**INT2** déclenche une interruption et **INTF2** est mis à 1 si le bit dans **SREG** et le bit **INT2** dans **GICR** est à un. Le microcontrôleur sautera au vecteur d'interruption. Le drapeau est remis à 0 quand la routine d'interruption est exécutée. Le bit peut être remis à 0 par programme. Ce drapeau est toujours remis à 0 quand **INT2** est configuré en entrée d'interruption. L'interruption avec l'**INT2** est mise hors de service quand ATmega128 entre en mode sommeil.

- Le Registre **TIFR** (*Timer/Counter Interrupt Flag*)

Le registre **TIFR** indique l'état des interruptions internes des modules Timer et Comparateur. Les interruptions seront prises en charge si le bit correspondant dans le registre **TIMSK** à été activé (mis à 1).

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$38	OCT2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	OCF0	TOV0
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

- **OCF2 Output Compare Flag 2** : Le bit est mis à 1 quand une donnée est arrivée et comparée entre le Timer/Counter2 et le contenu du registre d'**OCR2**. Le bit **OCF2** est remis à 0 par le matériel en exécutant le vecteur de l'interruption. On peut aussi forcer **OCF2** à 0.
- **TOV2 Timer/Counter2 Overflow Flag** : Le bit est mis à 1 quand le Timer/Counter2 déborde. **TOV2** est mis à 0 par le matériel lors de l'exécution de l'interruption. On peut aussi forcer **TOV2** à 0. Dans le mode **PWM**, ce bit est mis à 1 quand le Timer/Counter2 arrive à la valeur \$00.
- **ICF1 Timer/Counter1, Input Capture Flag** : Ce bit est mis à 1 quand un événement de capture arrive sur la broche **ICP1**. Quand le registre de capture **ICR1** est utilisé, le bit est mis à 1 par l'arrivée d'une valeur supérieure à **ICR1**. **ICF1** est automatiquement remis à 0 quand l'interruption est exécutée. On peut aussi forcer **ICF1** à 0.
- **OCF1A Timer/Counter1, Output Compare A Match Flag** : Ce bit est modifié après que le cycle d'horloge du minuteur atteint la valeur correspondant au registre **TCNT1**. Une comparaison forcée en sortie avec **FOC1A** ne mettra pas le bit à un. **OCF1A** est automatiquement remis à 0 lors de l'exécution de l'interruption. On peut aussi forcer **OCF1A** à 0.
- **OCF1B Timer/Counter1, Output Compare B Match Flag** : Ce bit est modifié après que le cycle d'horloge du minuteur atteint la valeur du registre **TCNT1**. Une comparaison forcée en sortie avec **FOC1B** ne mettra pas le bit à un. **OCF1B** est automatiquement remis à 0 quand l'interruption est exécutée. On peut aussi mettre le bit à 0.
- **TOV1 Timer/Counter1, Overflow Flag** : La mise à 1 de ce bit dépend du mode de fonctionnement défini pour le Timer/Compteur1. Dans le mode normal et **CTC**, le bit **TOV1** est mis à 1 quand le minuteur déborde. **TOV1** est automatiquement remis à 0 quand l'interruption est exécutée. On peut aussi mettre ce bit à 0.
- **OCF0 Output Compare Flag 0** : Ce bit est mis à 1 quand une arrivée est comparée entre le Timer/Counter0 et les données du registre **OCR0**. **OCF0** est remis à 0 par le matériel lors de l'exécution de l'interruption. On peut aussi mettre ce bit à 0.
- **TOV0 Timer/Counter0 Overflow Flag** : Ce bit est mis à 1 quand le Timer/Counter0 déborde. **TOV0** est automatiquement remis à 0 quand l'interruption est exécutée. On peut aussi mettre ce bit à 0. Dans le mode **PWM**, ce bit est mis à 1 quand le Timer/Counter0 arrive à la valeur \$00.

- **Le Registre TIMSK (Timer/Counter Interrupt Mask)**

Le registre **TIMSK** définit individuellement le masque pour les modules Timer, Compteurs et Compérateurs. Le masque autorise les interruptions s'il est à 1. S'il est à 0 l'interruption ne sera pas prise en compte. Lors de l'interruption, le registre **TIFR** contiendra le bit du module qui active l'interruption et qu'il faudra tester pour connaître le module en cause.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$39	OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	OCIE0	TOIE0
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

- **OCIE2 Timer/Counter2 Output Compare Match Interrupt Enable** : Quand ce bit est à 1 l'interruption est validée pour le Timer/Counter2. Le bit **OCF2** est modifié dans le registre **TIFR**.
- **TOIE2 Timer/Counter2 Overflow Interrupt Enable** : Quand ce bit est à 1 l'interruption est validée pour le Timer/Counter2. Le bit **TOV2** est modifié dans le registre **TIFR**.
- **TICIE1 Timer/Counter1, Input Capture Interrupt Enable** : Quand ce bit est à 1 l'interruption est validée pour le Timer/Counter1. Le bit **ICF1** est modifié dans le registre **TIFR**.
- **OCIE1A Timer/Counter1, Output Compare A Match Interrupt Enable** : Quand ce bit est à 1 l'interruption est validée pour le Timer/Counter1. Le bit **OCF1A** est modifié dans le registre **TIFR**.
- **OCIE1B Timer/Counter1, Output Compare B Match Interrupt Enable** : Quand ce bit est à 1 l'interruption est validée pour le Timer/Counter1. Le bit **OCF1B** est modifié dans le registre **TIFR**.
- **TOIE1 Timer/Counter1, Overflow Interrupt Enable** : Quand ce bit est à 1 l'interruption est validée pour le Timer/Counter1. Le bit **TOV1** est modifié dans le registre **TIFR**.
- **OCIE0 Timer/Counter0 Output Compare Match Interrupt Enable** : Quand ce bit est à 1 l'interruption est validée pour le Timer/Counter0. Le bit **OCF0** est modifié dans le registre **TIFR**.
- **TOIE0 Timer/Counter0 Overflow Interrupt Enable** : Quand ce bit est à 1 l'interruption est validée pour le Timer/Counter0. Le bit **TOV0** est modifié dans le registre **TIFR**.

2.6.4. La Mémoire EEPROM

L'**EEPROM** est une mémoire programmable est effaçable électriquement. La particularité de cette mémoire et de pouvoir garder les informations stockées longtemps même hors tension.

L'**ATmega128** contient 4096 octets de données dans la mémoire **EEPROM**. Elle est organisée comme un espace de donnée séparé, dans lequel des octets simples peuvent être lus et écrits. L'**EEPROM** a une endurance d'au moins 100,000 cycles d'écriture/effacement.

a). L'accès en Lecture/Ecriture dans l'EEPROM

L'espace mémoire de l'**EEPROM** est accessible par l'utilisation de registres spéciaux d'accès. Le temps d'accès en écriture dans l'**EEPROM** est donné dans la table suivante :

Symbole	Nombre de Cycle d'oscillateur RC interne	Temps Typique de Programmation
Ecriture EEPROM	8448	8.5 ms

Le temps d'attente d'écriture de l'EEPROM doit être géré par le logiciel utilisateur qui doit détecter la fin de l'écriture par l'intermédiaire du registre **EECR**.

Quand l'**EEPROM** est lu, l'Unité Centrale est interrompue pour quatre (04) cycles d'horloge avant que l'instruction suivante ne soit exécutée. Quand l'**EEPROM** est écrit, l'Unité Centrale est interrompue pour deux (02) cycles d'horloge avant que l'instruction suivante ne soit exécutée.

L'**EEPROM** utilise les trois (03) registres suivants :

- Le Registre EEAR (*The EEPROM Address Register*)

Le registre d'adressage de l'**EEPROM** est divisé en deux (02) parties pour les mémoires supérieurs à 256 octets.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$1F	-	-	-	-	-	-	EEAR9	EEAR8
L/E	L	L	L	L	L	L	L/E	L/E
\$1E	EEAR7	EEAR6	EEAR5	EEAR4	EEAR3	EEAR2	EEAR1	EEAR0
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

Avec : - **EEARx** (**EEPROM Adresse Register**) : ce registre contient l'adresse de la case **EEPROM** à écrire ou à lire.

- Le Registre EEDR (*The EEPROM Data Register*)

Le registre de données de l'**EEPROM** qui est lu ou écrit dans la mémoire **EEPROM**.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$1E	EEDR7	EEDR6	EEDR5	EEDR4	EEDR3	EEDR2	EEDR1	EEDR0
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

Avec : - **EEDRx** (**EEPROM Data Register**) : ce registre stocke les données à écrire ou à lire.

- Le Registre EECR (*The EEPROM Controle Register*)

Le registre de contrôle de l'**EEPROM** permet de définir le fonctionnement de celle-ci.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$1C					EERIE	EEMWE	EEWE	EERE
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

Avec : - **EERIE** (**EEPROM Ready Interrupt Enable**) Validation de l'interruption **EE_RDY**, se produisant quand une opération de lecture ou écriture est terminée.

- **EEMWE** (**EEPROM Master Write Enable**) Autorisation d'écriture dans la mémoire (voir procédure).
- **EEWE** (**EEPROM Write Enable**) Seconde autorisation d'écriture dans la mémoire (voir procédure).
- **EEMWE** (**EEPROM Read Enable**) Demande de lecture de la mémoire **EEPROM**.

2.6.5. Les Entrées/Sorties Numériques (PORTx)

Les microcontrôleurs **Atmel** sont pourvus de ports d'entrées/sorties numériques pour communiquer avec l'extérieur. Ces ports sont multidirectionnels et configurable broche à broche soit en entrée, soit en sortie.

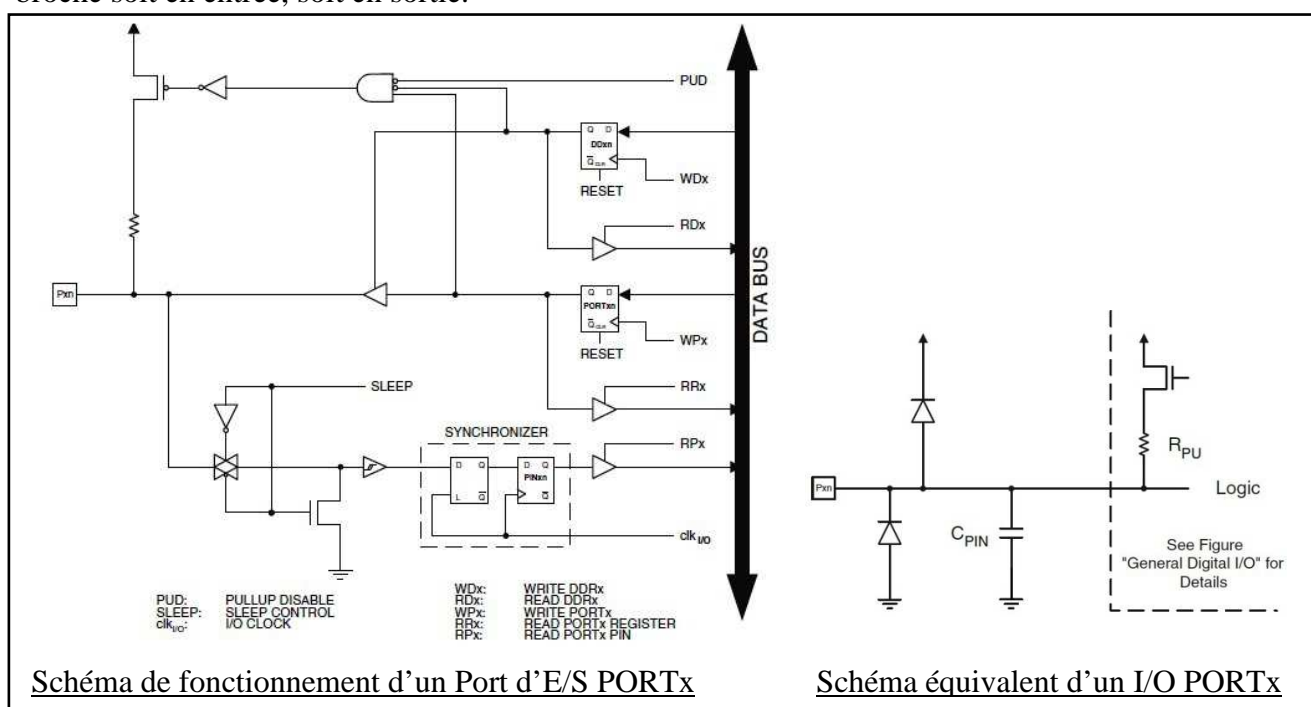


Figure 2.11 : Synoptique des ports I/O PORTx en général

La gamme **ATmega** dispose trois (03) registres pour contrôler le mode de fonctionnement de chaque broche d'un port PORTx. Avec x représente le nom de port (A, B, C, D, E, F & G). Ces registres sont configurables bit à bit, c'est à dire que sur l'on peu utiliser sur le même port des fonctions en entrée et/ou en sortie simultanément :

- Le Registre de Direction DDRx (Data Direction Register) [Mode Entrée, Sortie]

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$xy	DDRx7	DDRx6	DDRx5	DDRx4	DDRx3	DDRx2	DDRx1	DDRx0
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

Le bit respectif d'un port PORTx peut être placé en entrée en mettant son correspondant bit DDRx à 0 ou en sortie avec un 1.

- Le Registre de données PORTx (Data Register Port) [Donnée à lire ou à écrire]

Le registre **PORTx** permet de configurer la résistance de tirage ou la valeur à sortir.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$xy	PORTx7	PORTx6	PORTx5	PORTx4	PORTx3	PORTx2	PORTx1	PORTx0
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

Le bit y respectif d'un port PORTx qui est en entrée sera connecté à une résistance de tirage si son correspondant bit PORTxy dans le registre PORTx est à 1 et si le bit **PUD** de

SFIOR est à 0. Si le port est en sortie, le bit correspond à la valeur que l'on souhaite sur le port : 0 en bas, 1 en haut.

- Le Registre PINx (Reading the Pin Value)

Le registre **PINx** permet de lire le contenu d'un port quelle que soit sa configuration en entrée ou en sortie. Ce registre n'est accessible quant lecture, l'écriture ne sera considérée comme nul et sans effet.

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$xy	PINx7	PINx6	PINx5	PINx4	PINx3	PINx2	PINx1	PINx0
L/E	L	L	L	L	L	L	L	L

- Le Registre SFIOR (Special Function I/O Register)

Le registre spécial **SFIOR** permet de modifier le fonctionnement des entrées/sorties pour les ports PORTx (**PUD**).

Adresse	7	6	5	4	3	2	1	0
\$30	ADTS2	ADTS1	ADTS0	-	ACME	PUD	PSR2	PSR10
L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E	L/E

PUD: Pull-up disable : quand ce bit est à 1 les résistances de tirage sont désactivées et les ports PORTx en entrées sont en mode 3 états. Les résistances de tirage sont activées quand ce bit est à 0.

2.6.6. Le Comparateur Analogique (AC)

Le comparateur analogique compare les valeurs d'entrée sur la broche positive **AIN0 (PB2)** et la broche négative **AIN1 (PB3)**. Quand la tension sur la broche **AIN0** est plus haute que la tension sur la broche **AIN1**, le comparateur analogique **ACO** est mis à 1. Le comparateur analogique peut être utilisé pour déclencher la fonction de capture d'entrée du Timer/Compteur1. De plus, le comparateur analogique peut déclencher une interruption séparée exclusive. L'utilisateur peut choisir le front montant ou descendant pour déclencher la sortie **ACO**. L'entrée négative du comparateur peut être l'une des 8 entrées analogiques de l'ADC.

Le schéma synoptique du comparateur analogique de l'ATmega est représenté dans la figure 2.12 suivante.

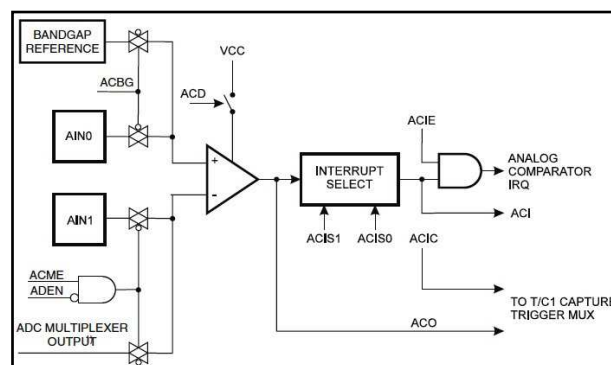


Figure 2.12 : Synoptique du comparateur analogique dans l'ATmega128

2.6.7. Le Convertisseur Analogique / Numérique (ADC)

Le convertisseur analogique/numérique **ADC** intégré dans l'**ATmega128** est doté de caractéristique très intéressante avec une résolution sur 10 bits, 8 entrées simultanées avec une non linéarité inférieur à $\frac{1}{2}$ **LSB**, une erreur à 0 V inférieur à 1 **LSB**, le temps de conversion est réglable de 65 à 260 μ S plus le temps est long, plus le résultat est précis. Près de 15000 échantillons/secondes avec le maximum de résolution son possible. Le convertisseur possède 7 entrées différentielles normales et 2 entrées différentielles avec gain optionnel de 10 x (et 200 x sur les boîtiers carré **TQFP** et **MLF** uniquement). La tension de référence peut être externe (conversion de **0** à **AREF** analogique, le maximum étant **VCC**) ou peut être interne avec la tension de référence de **2,56 V**. L'ADC à une interruption sur conversion complète. La limitation du bruit en mode de sommeil est possible.

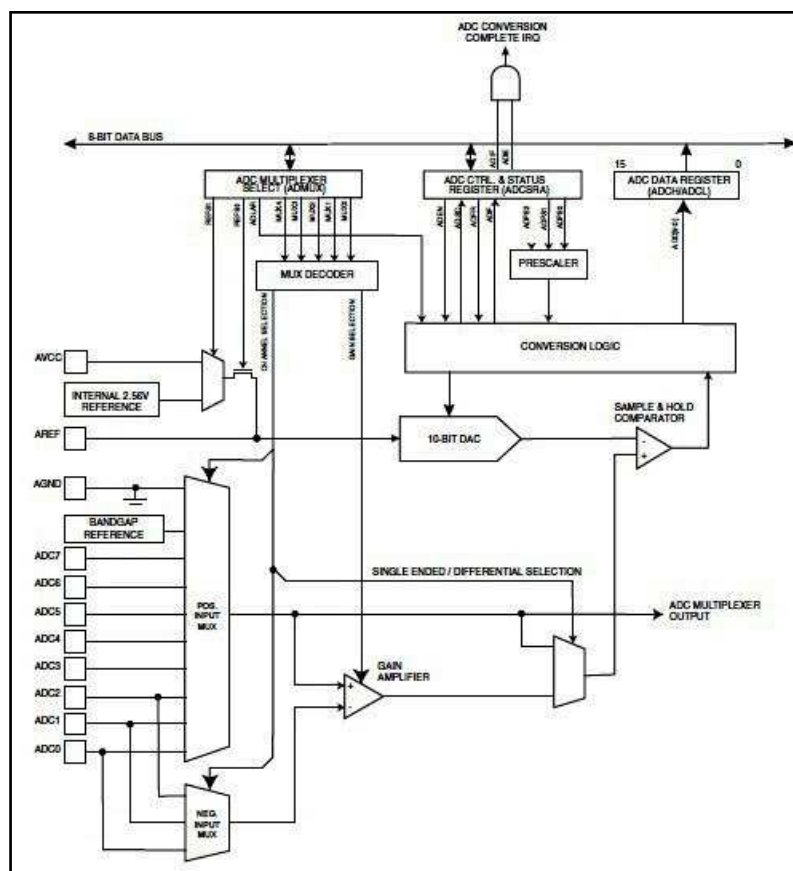


Figure 2.13 : Schéma en bloc de l'ADC dans l'ATmega128

2.6.8. Le Timer/Compteur0 à 8 Bits (TIMER0)

Un Timer/Compteur est un ensemble logique qui permet d'effectuer du comptage : de temps, d'événements, de base de temps pour la génération de signaux...

Le Timer/Compteur0 est un compteur à 8 bits avec les particularités principales :

- Remise à 0 du compteur sur Comparaison (Rechargement Automatique)
- Générateur de Modulation de Phase en Largeur d'Impulsion (**PWM**)
- Générateur de Fréquence

- Compteur d'Événement Externe
- Horloge à 9 bits avec pré diviseur
- Interruption sur Débordement et Comparaison (**TOV0** et **OCF0**).

La figure suivante représente la vue le synoptique simplifié du Timers/Compteur à 8 bits

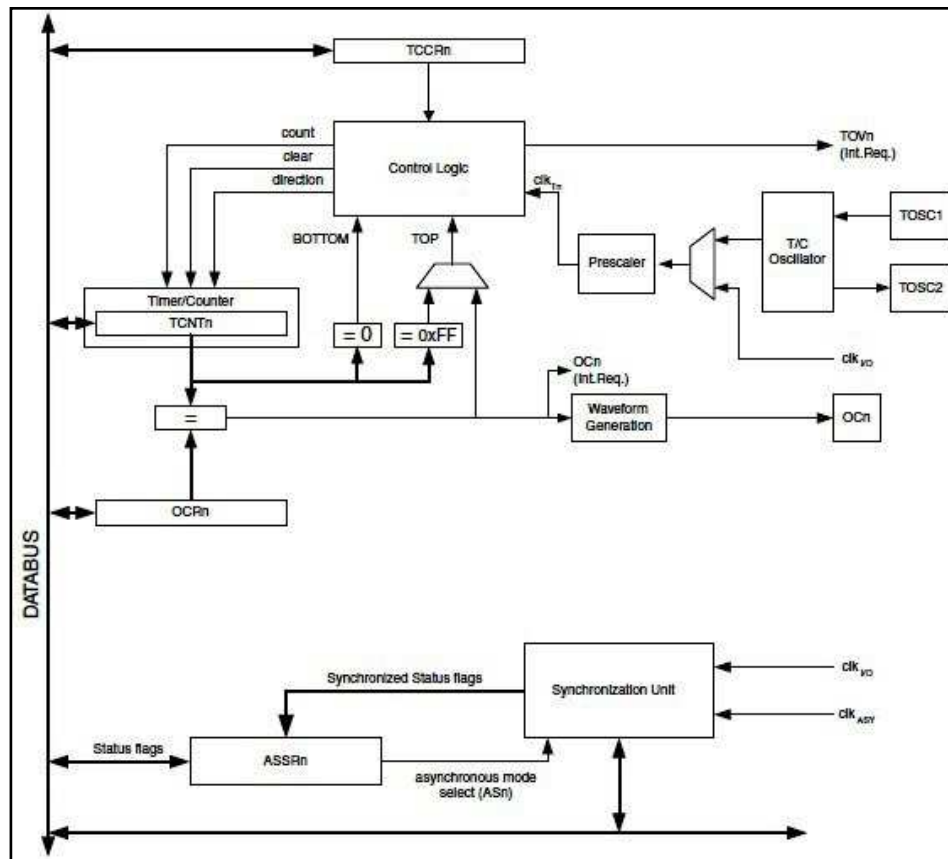


Figure 2.14 : Synoptique du Timer/Compteur0 pour l'ATmega128

2.6.9. Le Timer/Compteur1 et Timer/Compteur3 (Timer3) à 16 Bits

L'unité de Timer/Compteur1 à 16 bits permet le cadencement précis des programmes, la gestion d'événement, la génération d'onde, etc. Quinze (15) modes sont disponibles avec le Timer et les particularités principales sont :

- Une Conception 16 bits totale
- Deux Unités de Comparaison Indépendante
- Double Comparateur
- Une Unité de Capture d'Entrée à faible Bruit
- Comparateur avec remise à 0 Automatique
- Générateur de Modulation de Phase en Largeur d'Impulsion Correct (**PWM**)
- Générateur d'onde **PWM** Périodique
- Générateur de Fréquence
- Compteur d'Événement Externe

- Quatre (04) Sources Indépendant d'Interruption (**TOV1**, **OCF1A**, **OCF1B** et **ICF1**).

Une synoptique simplifié du Timer/Compteur1 à 16 bits avec les broches d'entrée-sortie est illustrée dans la figure 2.15 ci-dessous.

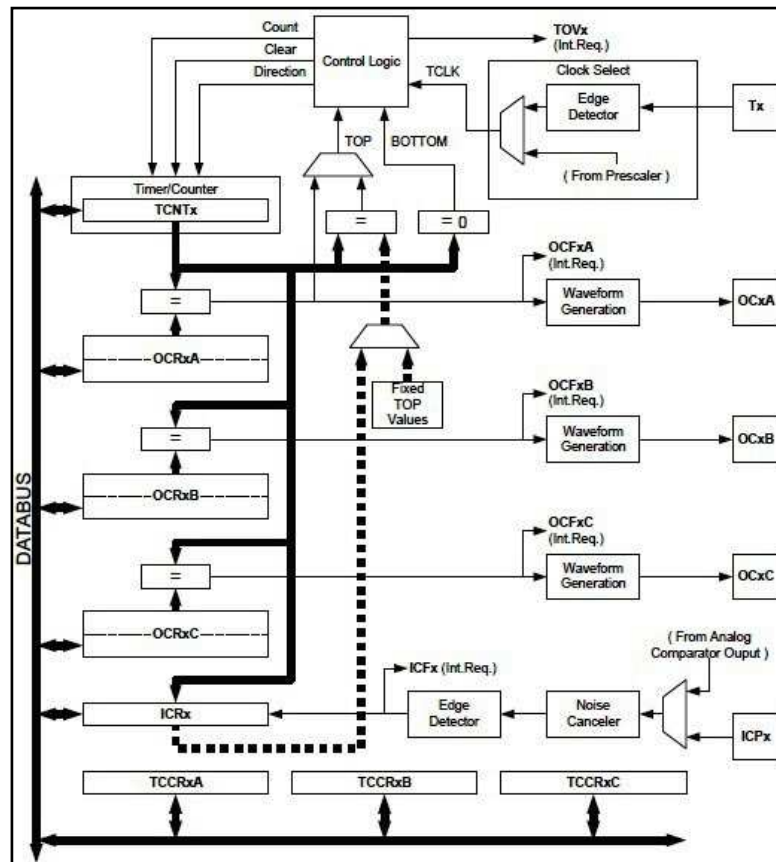


Figure 2.15 : Synoptique du Timer/Compteur1 à 16 Bits pour l'ATmega128

2.6.10. Le Timer/Compteur2 à 8 Bits (Timer2)

Le Timer/Compteur2 à usage général à 8 bits a des particularités principales suivantes :

- Simple Compteur à 8 bits
- Comparaison à Rechargement Automatique
- Générateur de Modulation de Phase en Largeur d'Impulsion Correct (**PWM**)
- Générateur de Fréquence
- Horloge à 10 bits de Pré diviseur
- Source d'Interruption sur Débordement et Comparaison (**TOV2** et **OCF2**)
- Horloge Externe 32 768 **Hz** par Quartz Indépendant

Le synoptique de fonctionnement du Timer/Compteur2 est représenté dans la figure 2.16 suivante :

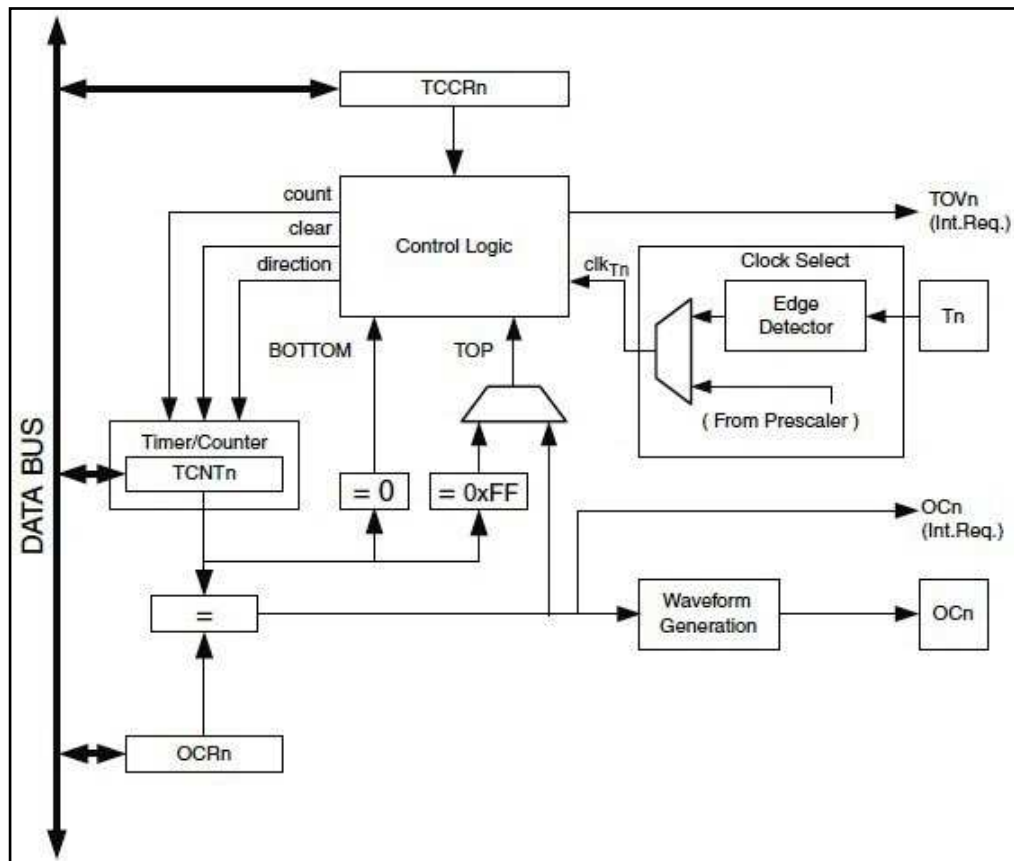


Figure 2.16 : Synoptique du Timer/Compteur2 à 8 bits pour l'ATmega128

2.6.11. L'interface Série Synchrone SPI

L'interface SPI est l'abréviation *Serial Peripheral Interface Synchronous*, soit Interface Série Synchrone. Contrairement à l'**UART** et comme son nom l'indique, ce type de périphérique génère les signaux d'horloge de synchronisation, arbitré par un Maître, c'est une interface série à 4 fils. L'interface **SPI** permet le transfert de données ultrarapide synchrone entre le microcontrôleur **ATmega128** et des périphériques ou entre plusieurs dispositifs. L'interface **SPI** inclut les particularités suivantes :

- Transfert de Données Full Duplex à Quatre Fils Synchrone
- Maître ou Esclave
- Transfert de Données avec **LSB** d'abord ou **MSB** en premier
- 7 Taux de Transfert Programmables
- Drapeau de Fin de Transmission pour Interruption
- Protection de Drapeau de Collision
- Mode Inoccupé
- **SPI** Mode Maître à Vitesse Double (**CK/2**)

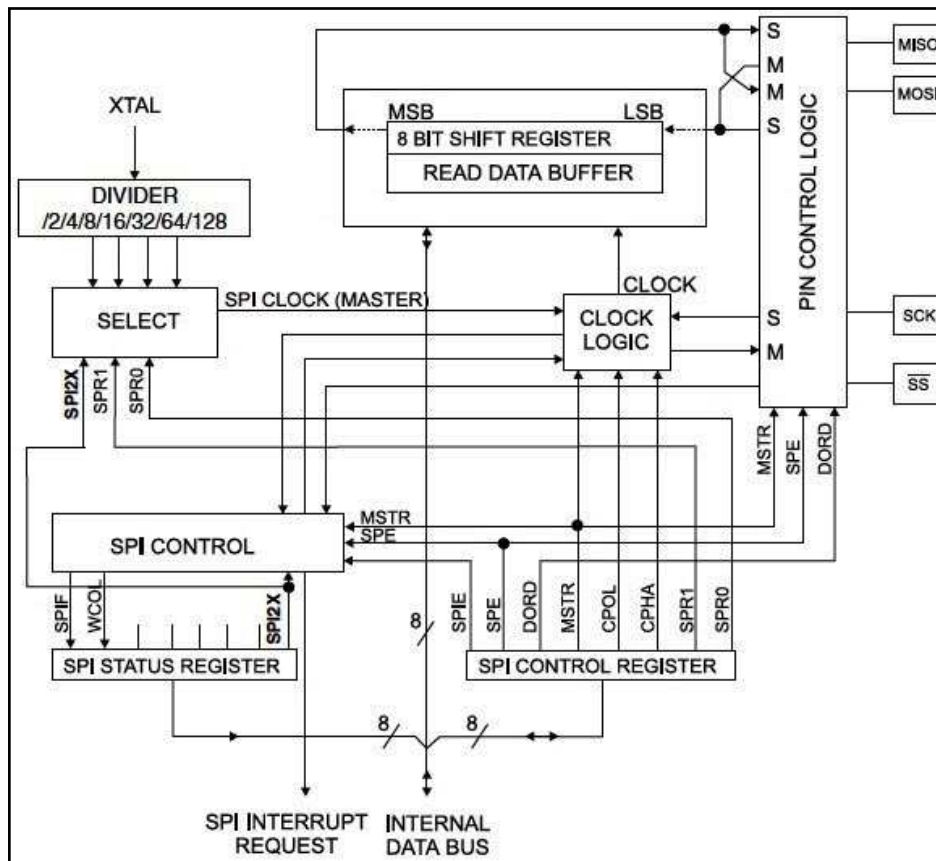


Figure 2.17 : Synoptique de l'interface **SPI** pour l'ATmega128

2.6.12. L'interface Série USART

L'**USART** est l'abréviation de *Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter*, soit Interface Série Synchrone et Asynchrone avec les caractéristiques suivantes :

- Générateur interne de fréquence de cadencement
- Asynchrone et Synchrone opération
- Horloge Maître ou Esclave
- Echanges de données sur 5 à 9 bits et 1 ou 2 bits de stop
- Gestion des parités
- Communication en Full duplex (peut émettre et recevoir en même temps)
- Protection des débordements
- Détection de faux départs de transmission
- Filtrage de l'entrée
- Plusieurs interruptions programmables sur le mode émission et réception
- Mode double vitesse de communication

L'application principale de ce périphérique est la communication entre le microcontrôleur ATmega128 et un ordinateur via le port série **RS232**.

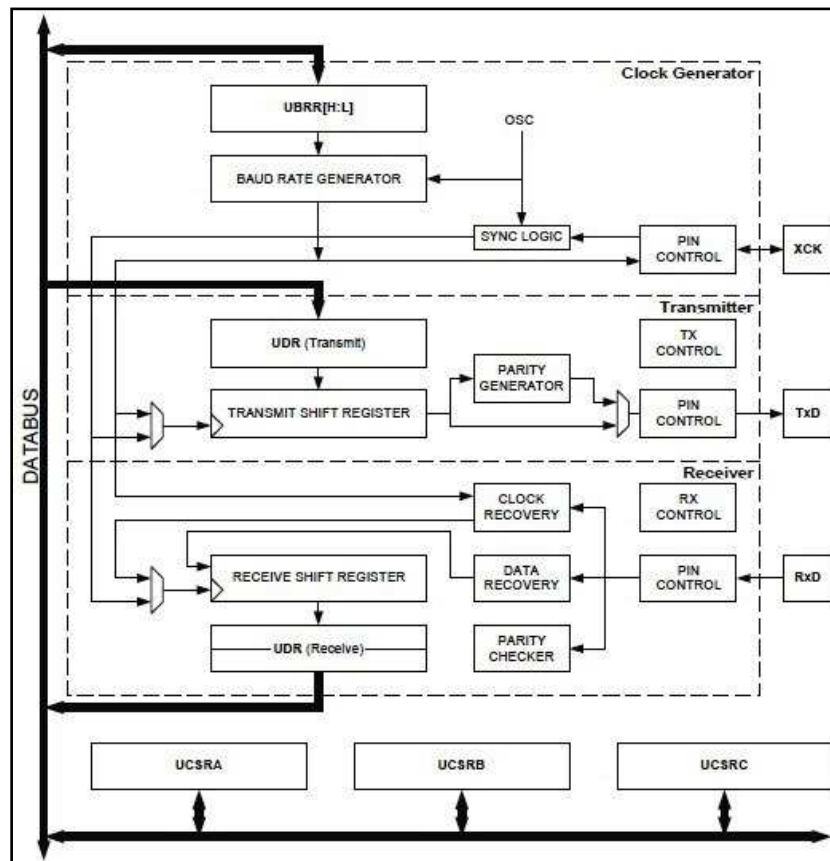


Figure 2.18 : Synoptique de l'USART pour l'ATmega128

2.6.13. L'interface I2C (TWI)

L'interface à deux conducteurs périodique **TWI** est un dérivé de l'interface **I2C** de Philips, c'est une nouveauté du modèle **ATmega**, il n'existe pas dans les versions précédentes **AT89** et **AT90**.

Le protocole **TWI** permet de connecter jusqu'à 111 systèmes différents employant seulement deux lignes de bus bidirectionnelles, un pour l'horloge **SCL** et un pour les données **SDA**. Le seul matériel externe nécessaire pour la mise en œuvre du bus est un simple jeu de résistance pour chacune des lignes (**R1**, **R2**).

Tous les systèmes connectés au bus ont des adresses individuelles et les mécanismes de control sont inhérents au protocole **I2C**.

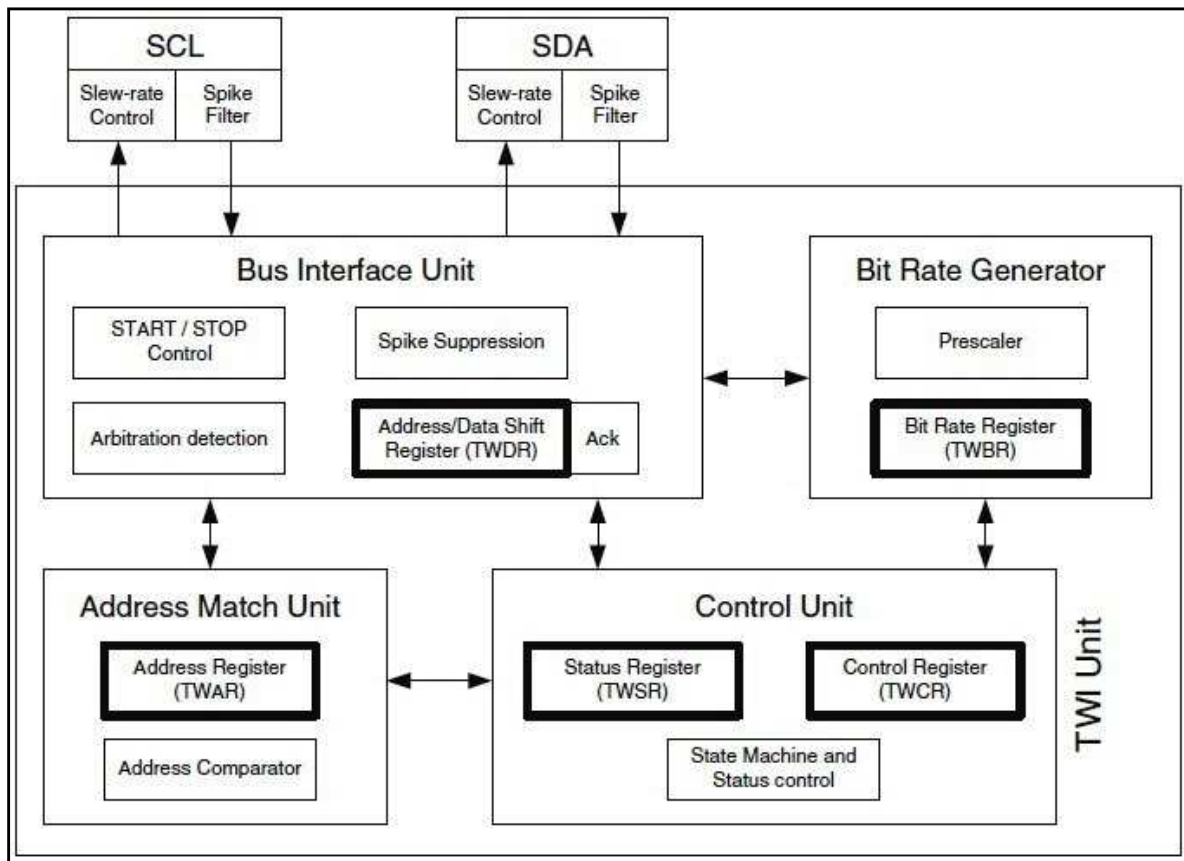


Figure 2.19 : Vu d'ensemle du Module TWI (I2C) pour l'ATmega128

Chapitre 3 : Généralités sur les rayonnements

3.1. Introduction

Un rayonnement est défini comme un mode de propagation de l'énergie dans l'espace, vide ou matériel. Cette énergie, qui est dite "*énergie rayonnée*" ou "*énergie radiante*", se trouve sous la forme soit d'ondes électromagnétiques (photon), soit de particules massives (*rayonnement corpusculaire*) [15].

3.2. Classification des rayonnements

a) Les rayonnements ionisants

Ce sont les rayonnements dont l'énergie est suffisante pour arracher un électron aux atomes du milieu absorbant et les transformer en ions positifs. L'atome le plus facilement à être ionisé est le potassium, avec une énergie d'ionisation de 4,3 eV. L'énergie de liaison des électrons les moins liés des atomes de la matière vivante (H, C, N, O) est 12,4 eV. Les rayonnements peuvent être, selon leur nature, directement ou indirectement ionisants :

- Les rayonnements directement ionisants :

Ce sont des particules chargées qui délivrent leur énergie directement à la matière, par le jeu des forces coulombiennes. Les transferts d'énergie dépendent des particules et de leur énergie, on distingue les particules chargées lourdes (proton, deuton, alpha, ions lourds) et les particules légères (électrons).

- Les rayonnements indirectement ionisants :

Electriquement neutres, ils sont susceptibles de transférer une fraction ou la totalité de leur énergie en une seule interaction à des particules chargées. Ce sont ensuite ces particules secondaires qui ionisent le milieu. Dans ce cas, l'ionisation se fait en deux étapes. Les rayonnements électromagnétiques (X et γ) et les neutrons entrent dans cette catégorie.

b) Les rayonnements non ionisants

Ce sont des rayonnements qui n'ayant pas une énergie suffisante pour ioniser les atomes come les électromagnétiques (onde radio, Ultra-violet ...).

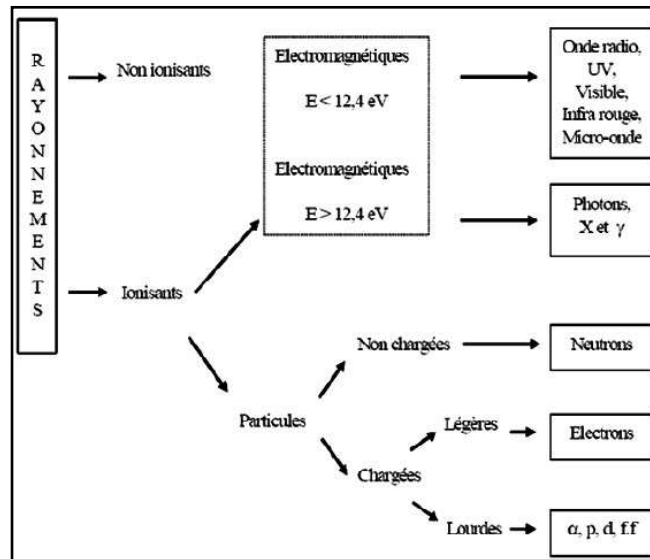


Figure 3.1 : Classification des rayonnements

3.3. Les sources de rayonnements

En générale une source de rayonnement est un milieu, objet ou un appareil qui peut transformer de l'énergie sous une forme quelconque en énergie radiante (rayonnement).

- Une lampe transforme de l'énergie électrique en énergie radiante (lumière)
- Une substance radioactive transforme l'énergie nucléaire en énergie radiante (rayonnement radioactive)

3.3.1. Les rayonnements électromagnétiques

Une onde électromagnétique correspondant à la propagation d'un champ magnétique et d'un champ électrique (l'un étant perpendiculaire à l'autre) en ligne droite à partir d'une source. Le rayonnement électromagnétique trouve son origine :

- Lors d'une transition électronique entre les 02 états d'énergie d'une molécule ou d'un atome
- Lors de la transition d'un nucléon entre les états d'énergie du noyau (γ)
- Lors du freinage d'une particule chargé dans la matière

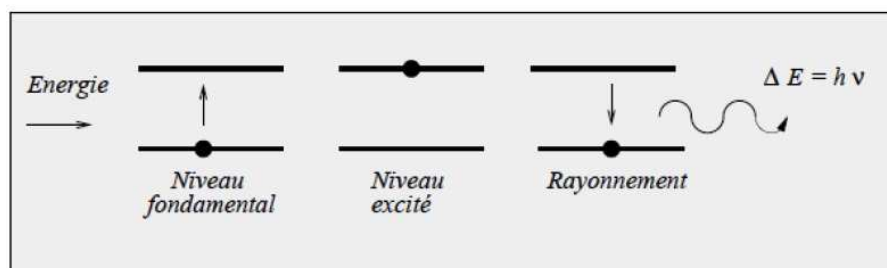


Figure 3.2 : Principe de l'émission d'un photon lors d'une transition entre 2 niveaux énergétiques

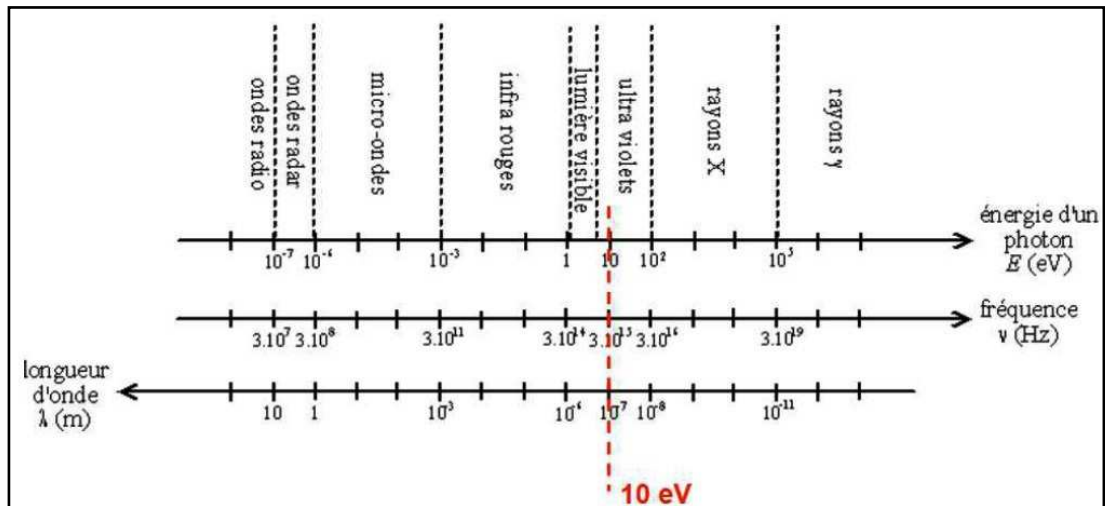


Figure 3.3 : Spectre des ondes électromagnétiques

3.3.2. Les rayonnements corpusculaires

Ce sont des rayonnements formés par des particules massives comme électron, proton, ions....etc. Des faisceaux de ces rayonnements peuvent être produits par :

- Substances radioactives
- Accélérateur de particules
- Réacteurs nucléaires...etc.

3.4. L'interaction des rayonnements avec la matière

Suivant sa nature, son énergie et la nature du milieu traversé, divers processus se manifestent. On est alors concerné par le devenir du faisceau de rayonnement utilisé (*absorption, diffusion, ralentissement, etc.*) et par ses conséquences directes (*ionisation, excitations, création de défauts, production d'espèces chimiques, etc.*). Ceci est indispensable, en particulier parce qu'une bonne connaissance du devenir d'un faisceau conduit aux méthodes de détection et à la compréhension des effets radio-induit.

3.4.1. Section efficace d'interaction

La section efficace (aire équivalente) d'interaction (σ) caractérise la probabilité que se produise une interaction d'un type déterminé entre une particule incidente et une particule cible. Elle dépend de l'énergie de la particule incidente et de la nature de la particule cible. La section efficace est proportionnelle au taux d'interaction.

L'unité utilisée est le **barn** (10^{-24} cm^2).

S'il y a plusieurs types d'interaction élémentaire alors la section efficace totale (*microscopique*) s'écrit σ_{tot} :

$$\sigma_{\text{tot}} = \sum_i \sigma_i \quad (3.1)$$

Où : σ_i est la section efficace de l'interaction de type i .

La section efficace macroscopique σ_{ma} (unité cm^{-1}) caractérise l'interaction d'un nombre des particules et un système de particule cible.

$$\sigma_{ma} = N_a \sigma \quad (3.2)$$

N_a est le nombre de particule du système par cm^3 .

$$\sigma_{ma}(\text{tot}) = \sum_i \sigma_{ma}(i) \quad (3.3)$$

Où $\sigma_{ma}(i)$ est la section efficace macroscopique de l'interaction type i .

Si le système de particule cible est un mélange de particules différentes, alors la section efficace d'une interaction est :

$$\sigma_{ma} = \sum_i f_i \sigma_{ma}(i) \quad (3.4)$$

3.4.2. Interaction photon – matière

A. Interaction élémentaire

Lorsqu'on étudie comment un photon incident interagit avec la matière, plusieurs cas sont possibles :

- **Interaction photon-électron (*le plus souvent*) :**

- le photon transmet toute son énergie à un électron et disparaît : effet photo-électrique
- le photon transmet une partie de son énergie et est diffusé : effet-Compton
- le photon est dévié, sans perte d'énergie, par un électron : diffusion Thomson - Rayleigh
- le photon n'interagit pas avec la matière : il est transmis sans aucune perte d'énergie

- **Interactions photon-noyau (*rarement*) :**

- matérialisation
- réaction photo-nucléaire

A.1. La diffusion Rayleigh

C'est la diffusion élastique du photon incident sans transmission d'énergie au milieu traversé. Elle peut se concevoir comme le rebondissement d'un photon de très faible énergie $h\nu = 10$ à 100 eV ($12.3 < \lambda < 123$ nm) sur un électron très lié à l'atome rencontré. Il permet d'expliquer la couleur du ciel, dispersion de la lumière

A.2. La L'effet photoélectrique

Lorsqu'un photon entre en collision avec les électrons des couches internes d'un atome, on parle d'*effet photoélectrique*. Dans ce cas, la totalité de l'énergie du photon incident est absorbée par l'atome. Cette énergie est transférée à un électron qui est éjecté de sa couche électronique (énergie de liaison) et emporte l'excédent d'énergie sous forme d'énergie cinétique.

L'effet photoélectrique ne peut avoir lieu que si l'énergie du photon incident $h\nu$ est plus grande que l'énergie de liaison de l'électron E_l . L'énergie cinétique du photoélectron E_{cin} est finalement absorbée par le milieu.

$$E_{\text{cin}} = h\nu - E_I \quad (3.5)$$

L'atome se retrouve sous forme ionisé, et cette ionisation (primaire) est suivie d'une réorganisation en cascade du cortège électronique de l'atome (pour combler la lacune sur la couche dont a été expulsé l'électron) : il en résulte l'émission d'un autre photon (rayon : de Fluorescence) ou l'expulsion d'un électron d'une couche encore plus périphérique : l'électron- Auger.

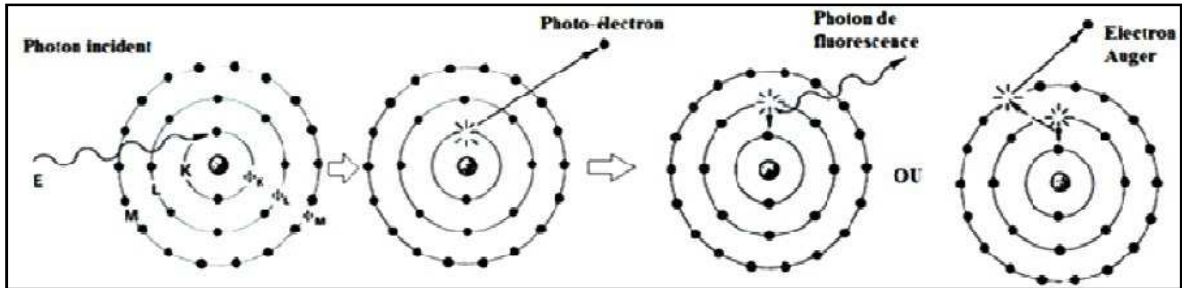


Figure 3.4 : Principe de l'absorption photoélectrique

A.3. La diffusion Compton

On parle d'*effet Compton* lorsqu'un photon est diffusé par un électron d'une couche externe de l'atome (électron quasi-libre) auquel il cède une partie de son énergie. Pour des photons de faible énergie ($< 0,5 \text{ MeV}$), la majeure partie de (diffusion); pour les photons d'énergie plus élevée ($> 2 \text{ MeV}$), c'est au contraire l'électron Compton qui emporte la plus grande partie de l'énergie (absorption)

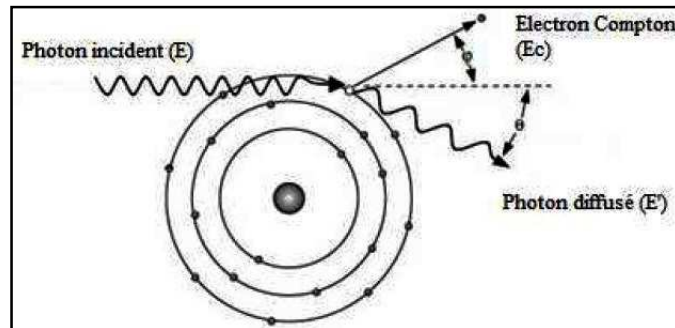


Figure 3.5 : Principe de la diffusion Compton

L'énergie du photon diffusé est donnée par :

$$E' = \frac{E}{1 + \varepsilon(1 - \cos\theta)} \quad (3.6)$$

L'énergie de l'électron Compton est donnée par :

$$E_c = E \frac{2\varepsilon}{1 - 2\varepsilon + (1 + \varepsilon)^2 \tan^2 \varphi} \quad (3.7)$$

La relation entre les angles de diffusion est donner par :

$$\cotg \varphi = (1 + \varepsilon) \tan \frac{\theta}{2} \quad (3.8)$$

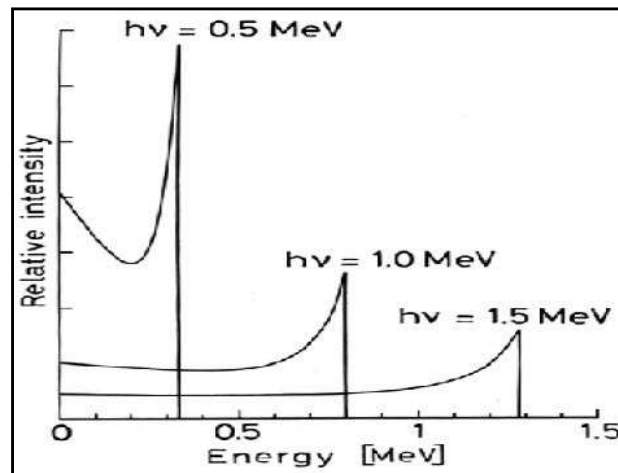


Figure 3.6 : Distribution en énergie des électrons de recul après diffusion Compton.
Les "pics" sont appelés Compton edge

A.4. La production de paires d'électrons (effet de matérialisation)

Dans le champ électrique intense qui règne au voisinage du noyau, le photon peut se matérialiser sous forme d'un électron et d'un positon. Une énergie de $2 \times 0,51 \text{ MeV}$, correspondant à leurs masses, est dépensée pour créer l'électron et le positon. L'excédent d'énergie se répartit, sous forme d'énergie cinétique, entre les deux articles. L'électron et le position sont ensuite ralentis dans la matière par suite de collisions. Lorsqu'il est suffisamment lent, le positon rencontre un électron du milieu et les deux particules s'annihilent en émettant deux photons de $0,51 \text{ MeV}$.

A.5. Les réactions photo-nucléaires

Elles mettent en jeu des énergies de photon importantes. Ces sont des réactions du type (γ, n) (γ, p) ou de photofissions qui nécessitent l'arrachement d'un nucléon ou la transmission à un gros noyau d'une énergie d'excitation telle qu'il se scinde en deux fragments.

B. Interaction globale

Pour des photons traversant un milieu donné, tout les effets peuvent se produire, mais avec une probabilité différente selon l'énergie des photons et la nature du milieu.

Schématiquement, l'effet photoélectrique est nettement prépondérant pour des photons γ de faible énergie et la création de paires est l'effet principal pour les photons de haute énergie. L'effet Compton se produit principalement dans le domaine d'énergie intermédiaire. Les limites entre ces domaines énergétiques dépendent de la matière traversée.

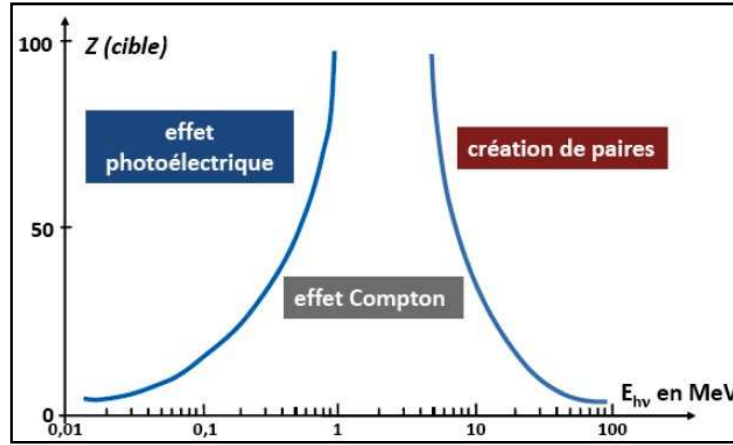


Figure 3.7 : Domaine de prédominance en fonction de Z (cible) et de E (hv incident).

La section efficace d'interaction sera écrite :

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{c}} + \sigma_{\text{R}} + \sigma_{\text{M}} \quad (3.9)$$

σ_{ph} , σ_{c} et σ_{R} , σ_{M} sont respectivement les sections efficaces d'interaction photoélectrique, Compton, Rayleigh et de matérialisation.

L'atténuation d'un faisceau de photons à travers d'une cible mince d'épaisseur d résulte de la totalité des interactions intervenues dans les matériaux. Si n est le nombre d'atomes par m^3 contenue dans cette cible et N_0 le nombre de photons initialement présent dans le faisceau monoénergétique, le nombre N de particule restant à la sortie de la cible mince est :

$$N = N_0 e^{-\mu \cdot d} \quad (3.10) \quad \text{Avec} \quad \mu = n \sigma_{\text{tot}}$$

Il a donc la dimension de l'inverse d'une longueur et dépend de l'énergie E des photons incidents ainsi que de la nature du matériau.

Pour s'affranchir de la dépendance de ce coefficient avec l'état physique du matériau, le coefficient massique d'atténuation total (μ/ρ), qui aura la dimension (cm^2/g), est préférentiellement utilisé :

$$N = N_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho \cdot d} \quad (3.11)$$

ρ est la masse volumique du matériau.

Lorsque le milieu cible est constitué d'un mélange de composé élémentaires, le coefficient d'atténuation massique (total, de transfert ou d'absorption d'énergie) se définissent à partir de la fraction de chaque élément dans le mélange.

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{mélange}} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (3.12) \quad \text{avec} \quad w_i = \frac{m_i}{M}$$

Où m_i est la masse de l'élément et M la masse totale du mélange.

On définit La couche demie -atténuation ou bien CDA comme l'épaisseur nécessaire pour atténuer la moitié du faisceau de photons incident :

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3.13)$$

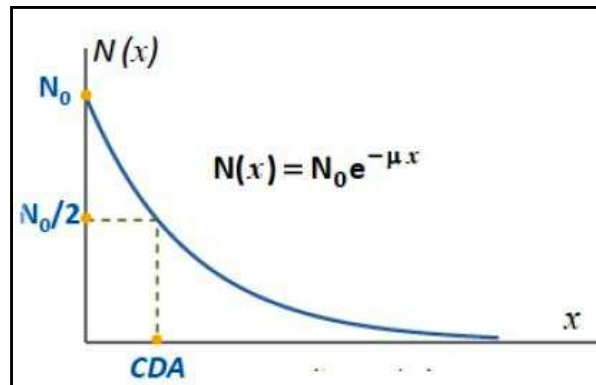


Figure 3.8 : La couche demie –atténuation ou CDA.

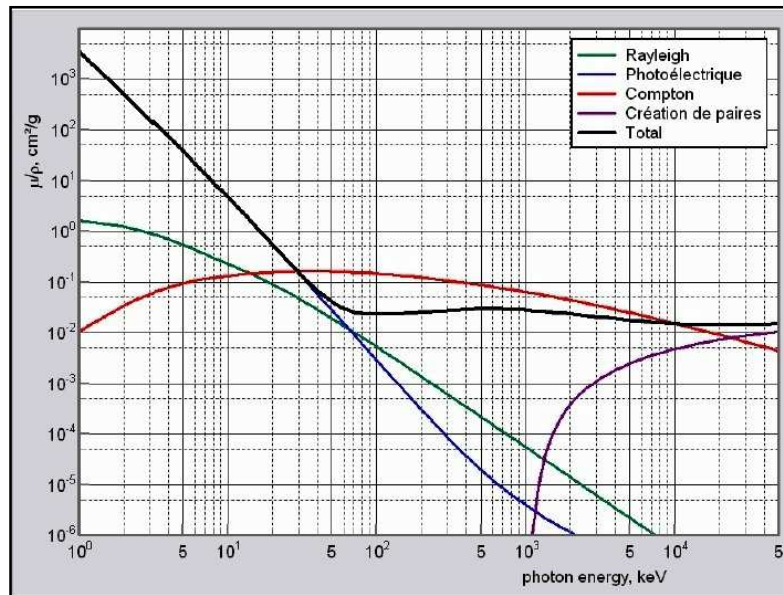


Figure 3.9 : coefficient d'atténuation massique (μ/ρ) dans l'air en fonction de l'énergie du photon

3.4.3. Interaction particules chargées – matière

Lors de leur passage dans la matière, les particules chargées perdent leur énergie par collisions inélastiques et élastiques avec les électrons et les noyaux atomiques du milieu ralentisseur. La perte d'énergie totale est caractérisée par le Transfert Linéique d'Énergie (TLE) est la somme des deux contributions : (TEL) électronique et nucléaire.

$$TEL = \left(\frac{dE}{dX} \right) = \left(\frac{dE}{dX} \right)_{col} + \left(\frac{dE}{dX} \right)_{rad} \quad (3.14)$$

A. Transfert linéique d'énergie électronique

Il représente la perte d'énergie par unité de longueur de trajectoire des particules incidentes consécutivement à leurs chocs avec les électrons. Son expression en mécanique relativiste, est donnée par la formule de Bethe-Bloch:

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{col} = NZ \frac{z^2 e^4}{8\pi\epsilon_0^2 m_e c^2 \beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (3.15)$$

- N: nombre des noyaux cibles par unité de volume de numéro atomique Z
- z et β sont respectivement la charge et la vitesse réduite du projectile, m. et e : masse au repos et charge de l'électron
- ϵ_0 : permittivité du vide
- m_e et e : masse au repos et charge de l'électron
- m_e et e : masse au repos et charge de l'électron
- T_{max} : énergie cinétique maximale transférée à un électron libre
- δ : correction due à l'effet de densité

I : la valeur moyenne du potentiel tenant compte de l'ionisation et de l'excitation des atomes ralentisseurs. Il est donné par la formule semi empirique (en eV) :

$$I = 9,1Z(1 + 1,9Z^{\frac{2}{3}}) \quad (3.16)$$

B. Transfert linéique d'énergie électronique

Lorsque l'électron passe au voisinage d'un noyau, il est dévié par le champ coulombien de l'atome cible et subit une décélération. Ce ralentissement s'accompagne d'une perte d'énergie sous forme de photons X appelé rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung.

L'énergie perdue par rayonnement de freinage est caractérisée par la formule suivante :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \frac{N.E.Z.(Z+1)e^4}{137m_e^2 c^4} \left(\ln \frac{2E}{m_e c^4} - \frac{1}{3} \right) \quad (3.17)$$

Cette formule compliquée se révélant d'utilisation difficile, on lui substitue une formule simplifiée :

$$\left(\frac{dE}{dX}\right) = I_s \times \omega \quad (3.18)$$

I_s est l'ionisation spécifique, c'est à dire le nombre d'ionisations que réalise la particule incidente par unité de longueur, ω est l'énergie moyenne d'ionisation, c'est-à-dire l'énergie moyenne nécessaire pour créer un paire ion/électron.

C. Parcours des particules chargées (range)

Le parcours d'une particule chargée dans un matériau donné est le trajet nécessaire pour que cette particule perde complètement son énergie cinétique. Il est représenté par R par une expression :

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dx}{dE} dE = \int_0^{E_0} \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE = \int_0^{E_0} \frac{1}{TLE} dE \quad (3.19)$$

La figure 3.11 suivante illustre un exemple d'expérience de transmission d'une particule alpha. Avec I comme **I** est le nombre de particules détecté en fonction de l'épaisseur t du milieu. Et I_0 est le nombre de particules détecté lorsqu'il n'y a pas d'absorbeur. La portée moyenne R_m et la portée extrapolée R_e sont indiquées dans la courbe dans cette figure.

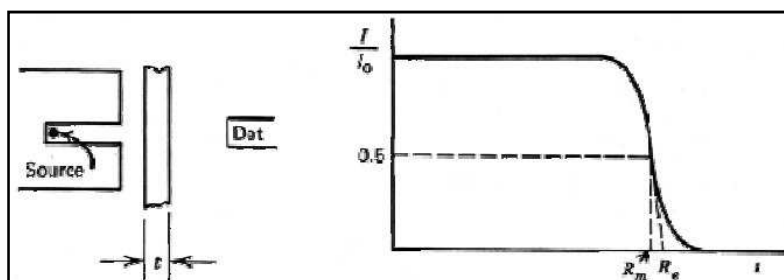


Figure 3.10 : Parcours dans l'expérience de transmission d'une particule alpha

D. La courbe de Bragg

Une autre grandeur extrêmement importante au regard du biologiste est la courbe de Bragg qui représente l'ionisation spécifique moyenne,

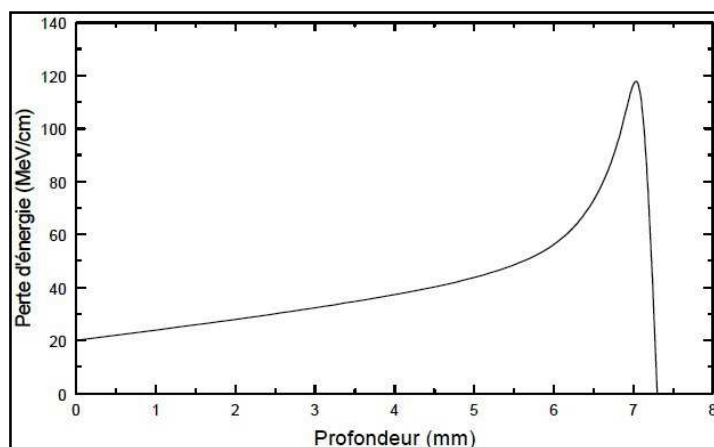


Figure 3.11 : Représentation d'une courbe de Bragg pour des protons dans l'eau

Applications en radiothérapie. En sélectionnant l'énergie cinétique des particules, on peut ajuster la profondeur du pic de Bragg à celle d'une tumeur.

3.4.4. Interaction particules chargées – matière

Lors de leur passage dans la matière, les particules chargées perdent leur énergie par collisions inélastiques et élastiques avec les électrons et les noyaux atomiques du milieu

ralentisseur. La perte d'énergie totale est caractérisée par le qui Transfert Linéique d'Energie (TLE) est la somme des deux contributions : (TEL) électronique et nucléaire.

$$TEL = \left(\frac{dE}{dX}\right) = \left(\frac{dE}{dX}\right)_{col} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} \quad (3.20)$$

A. Transfert linéique d'énergie électronique

Il représente la perte d'énergie par unité de longueur de trajectoire des particules incidentes consécutivement à leurs chocs avec les électrons. Son expression en mécanique relativiste, est donnée par la formule de Bethe-Bloch:

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{col} = NZ \frac{z^2 e^4}{8\pi\epsilon_0^2 m_e c^2 \beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (3.21)$$

- N: nombre des noyaux cibles par unité de volume de numéro atomique Z,
- z et β sont respectivement la charge et la vitesse réduite du projectile, m_0 et e : masse au repos et charge de l'électron,
- ϵ_0 : permittivité du vide
- m_e et e : masse au repos et charge de l'électron,
- T_{max} : énergie cinétique maximale transférée à un électron libre,
- Δ : correction due à l'effet de densité,
- I : la valeur moyenne du potentiel tenant compte de l'ionisation et de l'excitation des atomes ralentisseurs. Il est donné par la formule semi empirique (en eV) :

$$I = 9,1Z(1 + 1.9Z^{\frac{2}{3}})$$

B. Transfert linéique d'énergie nucléaire

Lorsque l'électron passe au voisinage d'un noyau, il est dévié par le champ coulombien de l'atome cible et subit une décélération. Ce ralentissement s'accompagne d'une perte d'énergie sous forme de photons X appelé rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung.

L'énergie perdue par rayonnement de freinage est caractérisée par la formule suivante :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \frac{N.E.Z.(Z+1)e^4}{137m_e^2 c^4} \left(\ln \frac{2E}{m_e c^4} - \frac{1}{3} \right) \quad (3.22)$$

Cette formule compliquée se révélant d'utilisation difficile, on lui substitue une formule simplifiée :

$$\left(\frac{dE}{dX}\right) = I_s \times \omega \quad (3.23)$$

I_s est l'ionisation spécifique, c'est à dire le nombre d'ionisations que réalise la particule incidente par unité de longueur, ω est l'énergie moyenne d'ionisation, c'est-à-dire l'énergie moyenne nécessaire pour créer un paire ion/électron.

C. Parcours des particules chargées (range)

Le parcours d'une particule chargée dans un matériau donné est le trajet nécessaire pour que cette particule perde complètement son énergie cinétique :

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dx}{dE} dE = \int_0^{E_0} \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE = \int_0^{E_0} \frac{1}{TLE} dE \quad (3.24)$$

3.4.5. Interaction des neutrons avec la matière

A. Calcification

- Les neutrons rapides dont l'énergie cinétique E_n est supérieure à 0,8 MeV,
- Les neutrons épithermiques : $1\text{eV} \leq E_n \leq 0,8\text{ MeV}$,
- Les neutrons thermiques : $E_n < 1\text{eV}$

B. Les différents types d'interaction

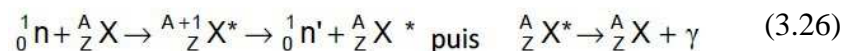
a)- La diffusion élastique

Le neutron incident est juste dévié de sa trajectoire initiale, l'interaction se réduisant à un simple transfert d'énergie cinétique :



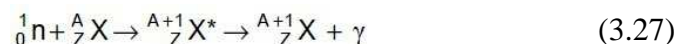
b)- La diffusion inélastique

La diffusion inélastique s'effectue avec la formation d'un noyau intermédiaire appelé "noyau composé" :



c)- La capture radiative

La capture radiative s'effectue également avec la formation d'un noyau composé. La désexcitation de ce noyau s'accomplit par l'émission d'un photon :



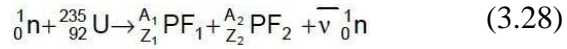
d)- Les réactions de capture type (n,p) et (n, α)

Exemple de réaction (n, α) : ${}_0^1n + {}_3^6\text{Li} \rightarrow {}_1^3\text{H} + {}_2^4\text{He} + 4.78\text{ MeV}$

Exemple de réaction (n,p) : ${}_0^1n + {}_7^{14}\text{N} \rightarrow {}_1^1\text{p} + {}_6^{14}\text{C}$

e)- Réactions de fission provoquées par les neutrons

Elles peuvent être provoquées, assez facilement, par des neutrons d'énergie cinétique très faible sur certains noyaux lourds, mais l'énergie libérée est très élevée, généralement de l'ordre de 200MeV



3.5. Grandeurs et unité radiométrique et dosimétrique

A. Les grandeurs radiométriques

Les quantités suivantes sont utilisées pour décrire globalement un faisceau de rayonnement ionisant mono énergétique dans un espace libre ou dans la matière: fluence de particules, fluence énergétique, débit de fluence de particules débit de fluence énergétique.

Ces quantités sont généralement utilisés pour décrire des faisceaux de photons et peut également être utilisé pour décrire faisceaux de particules chargées.

A.1. La fluence particulaire

La fluence permet de caractériser un champ d'irradiation appliqué à un espace libre ou dans la matière, pour tous les types de rayonnements. La fluence des particules notée ϕ , en un point P, du champ est calculée à partir du nombre de particules incidentes, dN , pénétrant une sphère infinitésimale, centrée en P, de section da :

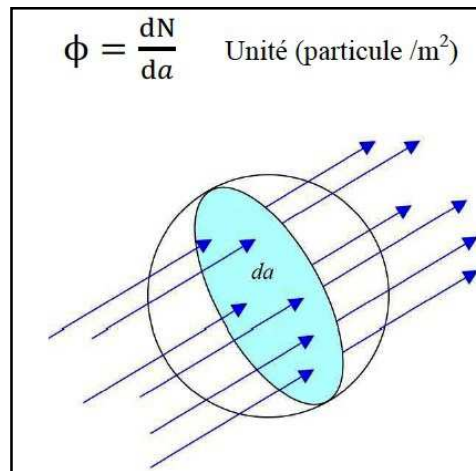


Figure 3.12 : La fluence particulaire

Le débit de fluence est ainsi défini comme la fluence par unité de temps :

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{dN^2}{dt.da} \quad \text{Unité (particule/m}^2\text{.s)} \quad (3.29)$$

A.2. La fluence énergétique

Afin d'introduire une grandeur en énergie, la notion d'énergie radiante R est utilisée. Elle représente l'espérance de l'énergie totale transportée par les dN particules traversant la sphère élémentaire. La fluence énergétique ϕ à travers la section da ,

$$\psi = \frac{dR}{da} \quad \text{Unité (J/m}^2\text{)} \quad (3.30)$$

Avec $dR = \sum_i E_i dN_i$ E_i est l'énergie d'une particule

Le débit de la fluence énergétique est donc :

$$\dot{\psi} = \frac{d^2R}{dt.da} \quad \text{Unité (J/m}^2\text{.s)} \quad (3.31)$$

Pour des rayonnements poly énergétique on définit le spectre de la fluence $\phi_E(E)$ et celui de la fluence énergétique $\psi_E(E)$:

$$\phi_E(E) = \frac{d\phi}{dE} \quad ; \quad \psi_E(E) = \frac{d\psi}{dE} \quad (3.32)$$

B. Grandeurs dosimétriques

B.1. L'exposition

L'exposition est définie, par convention pour les photons X et gamma (ICRU 1980), comme le quotient de la somme des charges électrique de tous les ions du même signe produit par une irradiation dans l'air, dans un certain volume par la masse de ce volume d'air :

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad \text{Unité (C/kg)} \quad (3.33)$$

Enceins unité utilisé est le Roentgen : $1 \text{ Roentgen} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$

B.2. Le kerma

Le kerma, K (Kinetic Energy Released in Matter), représente le transfert d'énergie à la matière à partir des particules non-chargées (ou indirectement ionisantes). Il est défini par le rapport entre dE_{tr} et dm , où dE_{tr} est une valeur prévisionnelle de la somme des énergies cinétiques initiales de toutes les particules ionisantes chargées et libérées par des particules incidentes ionisantes non-chargées dans un volume de masse dm de matière :

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad \text{Unité (J/kg) ou le (Gy)} \quad (3.34)$$

Le Kerma s'applique quelle que soit la nature du rayonnement indirectement ionisant.

Lorsque le milieu absorbant est l'air, on parle de Kerma et de débit de Kerma dans l'air, pour une source poly-énergétique :

B.3. La dose absorbée

La dose absorbée, en un point P se définit comme le rapport de l'énergie effectivement absorbée dans un élément de volume de masse dm .

Cette quantité physique a pour but de fournir une grandeur corrélée aux effets des rayonnements ionisants dans la matière. Alors que le kerma dépend uniquement des interactions dans la matière, la valeur de la dose absorbée est obtenue à partir de la valeur moyenne de la grandeur stochastique E_d , c'est-à-dire, l'énergie communiquée au milieu.

Cette énergie moyenne tient compte de l'énergie déposée par les particules ionisantes entrantes dans l'élément de volume R_e moins l'énergie emportée par celles qui en sortent R_s plus la somme de tous les changements concernant l'énergie au repos des atomes du milieu ΣQ .

$$E_d = R_e - R_s + \Sigma Q \quad (3.35)$$

$$D = \frac{d\bar{E}_d}{dm} \quad \text{Unité (J/kg) ou le (Gy)} \quad (3.36)$$

Le débit de dose sera donc :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad \text{Unité (J/kg.s) ou le (Gy/s)} \quad (3.37)$$

La dose absorbée est directement mesurable à l'aide d'instruments dosimétriques. Le calcul des doses absorbées dépend essentiellement de trois paramètres : nature des rayonnements, énergie ou spectre d'énergie de la fluence et la nature du milieu.

C. Doses radio-biologiques

C.1. Dose équivalente

La dose équivalente permet de mesurer les effets biologiques sur un tissu ou organe consécutifs à une exposition par un type de rayonnement ionisant. En effet, les dégâts observés sur un même tissu ou organe varient selon la nature du rayonnement. La dose équivalente, notée $H_{T,R}$, est obtenue en multipliant la dose absorbée dans un tissu ou organe par un facteur de pondération :

$$H_{T,R} = w_R \times D_{T,R} \quad (3.38)$$

où $D_{T,R}$ est la dose absorbée moyennée au tissu ou à l'organe et au rayonnement R ; w_R est le facteur de pondération lié à la nocivité du rayonnement.

Lorsque le rayonnement est de nature diverse (différents types de particules présents dans le faisceau) avec des valeurs de w_R distinctes, la dose équivalente totale est la somme des doses équivalentes liées à chaque rayonnement :

$$H_T = \sum_R H_{T,R} \quad (3.39)$$

La dose équivalente s'exprime en sievert (Sv), car elle tient compte des effets biologiques. Un Sievert correspondant à un gray (un joule par kilogramme de matière) pour les photons et les électrons.

Les valeurs de w_R , sont issues de données expérimentales radiobiologiques, et reposent principalement sur la notion d'efficacité biologique relative (EBR) des différents types de rayonnements par rapport aux effets stochastiques qu'ils produisent. L'EBR est liée aux différences de propriétés des dépôts d'énergie le long des traces des particules chargées mises en mouvement. Pour les photons et les électrons $w_R = 1$.

C.2. Dose efficace

La dose efficace, est la grandeur de protection radiologique de référence. Son utilisation principale consiste à fournir un moyen de démontrer la conformité avec les limites d'exposition des travailleurs et du public. Dans ce sens, la dose efficace est utilisée à des fins de réglementation. Elle est également utilisée pour limiter la survenue d'effets stochastiques en tenant compte des caractéristiques d'exposition données.

$$D_{\text{eff}} = \sum_T w_T H_{T,R} \quad (3.40)$$

L'unité de la dose efficace est le sievert (Sv). Le facteur de pondération tissulaire w_T , défini pour le tissu T (avec $\sum w_T = 1$), reflète la sensibilité de plusieurs tissus et organes à l'induction d'effets stochastiques.

Tableau 3.1 : Facteur de pondération tissulaire en fonction des organes ou tissu

Tissu ou organe	Facteur de pondération, w_T	$\sum w_T$
Moelle rouge, Côlon, Poumons, Estomac, Poitrine, Reste*	0,12	0,72
Gonades	0,08	0,08
Vessie, Œsophage, Foie, Thyroïde	0,04	0,16
Surface de l'os, Cerveau, Glandes salivaires, Peau	0,01	0,04
	Total	1

Chapitre 4 : Les détecteurs des rayonnements ionisants

4.1. Principe de détection des rayonnements ionisants

Les rayonnements nucléaires sont généralement invisibles, la mise en œuvre des systèmes de détection a pour but de la mise en évidence de l'existence du rayonnement ainsi que ses caractéristiques tel que :

- la nature de la particule.
- mesurer sa vitesse ou sa quantité de mouvement ou son énergie
- éventuellement la positionner dans l'espace à un instant donné (*mesure de la position et de l'instant de passage*).
- compter la particule.

Le principe de base de la détection consiste à faire interagir la particule d'intérêt avec de la matière pour lui prélever l'ensemble ou une partie de son énergie initiale. Dans la plupart du temps cette énergie prélevée est transformée en un signal électrique qui va être ensuite utilisé pour obtenir toutes les informations sur le rayonnement [15].

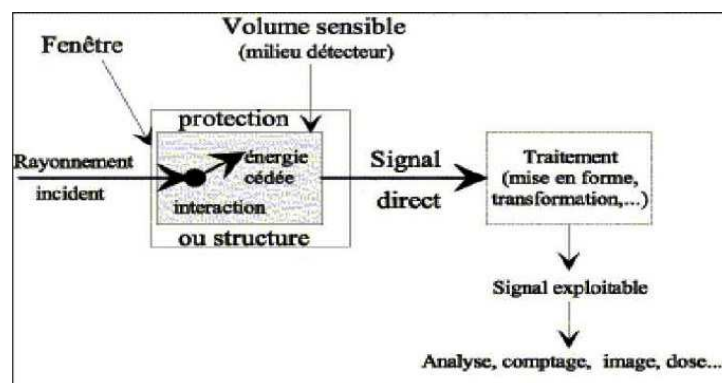


Figure 4.1 : Synoptique d'un détecteur de rayonnement

Au cours de l'interaction rayonnement-matière les différentes particules ou rayonnements existant interagissent différemment avec la matière. C'est la connaissance de ces processus d'interaction qui va nous permettre de construire les détecteurs adéquats permettant d'arriver au but de la détection, c'est à dire identifier, caractériser dynamiquement et localiser dans l'espace-temps une particule.

Un détecteur va donc être avant tout constitué de matière qui sera mis sur le parcours du rayonnement. Cette matière pourra être sous toutes les formes physiques connues solide, liquide ou gazeuse. Le choix et la nature de la matière dépendront des différents rayonnements que nous voulons étudier mais aussi des grandeurs physiques les concernant que nous voulons mesurer. Le coût financier jouera bien sûr aussi un rôle essentiel.

4.2. Modes de fonctionnement du détecteur

Deux (02) modes sont principalement utilisés en instrumentation :

- Le mode Courant.
- Le mode Impulsion.

4.2.1. Le mode Courant

C'est le mode de fonctionnement le plus simple. Il suffit de connecter un ampèremètre au détecteur. Si le courant est trop faible, il faut utiliser un amplificateur de courant linéaire et sensible. Il mesure un courant moyen qui va permettre de mesurer l'énergie moyenne laissée par un flux de particules. Nous recueillons une information moyenne sur une série de signaux pendant une fraction de seconde. Cela permet de minimiser les fluctuations mais nous perdons l'information véhiculée par chaque signal.

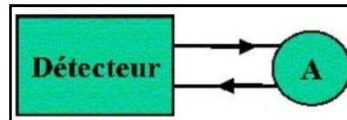


Figure 4.2 : Synoptique d'un détecteur en mode courant

Cette intensité moyenne I est exprimée par l'équation :

$$I = r \times Q = r \times E \times e/w \quad (4.1)$$

Avec :

r = Taux d'événements par seconde (taux de particules détectées par seconde).

Q = Charge moyenne produite par événement.

E = Énergie moyenne déposée par événement.

$e = 1,60217653 \times 10^{-19} C$: Charge de l'électron.

w = Énergie moyenne requise pour produire une paire chargée.

Il s'agit dans ce cas de faire de la débitmètrie. Nous l'utilisons essentiellement pour faire de la radioprotection (*mesure de dose*).

4.2.2. Le mode Impulsion

C'est ce dernier qui est le plus couramment utilisé. Il permet d'enregistrer le passage de chaque particule individuellement dans le détecteur. La charge collectée est directement reliée à l'énergie déposée dans le détecteur par la particule. Nous pourrions donc avec un tel mode de fonctionnement faire de la spectrométrie des particules.

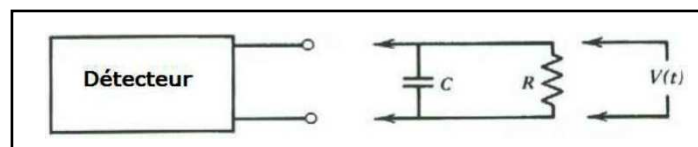


Figure 4.3 : Synoptique d'un détecteur en mode impulsion

R est appelée résistance d'entrée du circuit de mesure (ou *résistance de charge*). C est la capacité équivalente due au détecteur. RC est la constante du temps du circuit et avec t_c est le temps de collection des charges créées par la particule dans le détecteur.

On peut envisager 02 cas extrêmes suivant la valeur de la constante de temps τ du circuit de mesure :

- Cas où $RC \ll t_c$:

Le courant qui circule dans la résistance de charge est équivalent à la valeur instantanée du courant dans le détecteur. L'évolution, de la tension $V(t)$ en fonction du temps a la même forme que le courant $i(t)$.

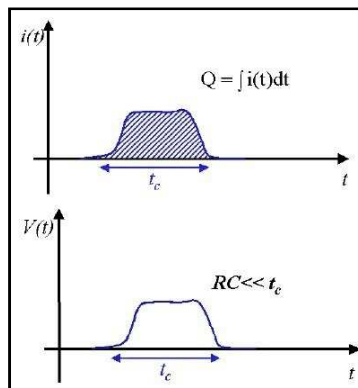


Figure 4.4 : détecteur à constante de temps courte

Dans ce cas la réponse du détecteur est rapide. Ce mode de fonctionnement, intéressant à haut débit de signaux, est difficile à mettre en œuvre car la mesure du maximum de tension de chaque signal est délicate et la sensibilité aux fluctuations de signaux est faible.

Cas où $RC \gg t_c$:

Dans ce cas, la capacité se charge doucement pendant le temps de collection et ainsi intègre tout au long de la collection le courant. Pendant ce temps là, peu de courant passe dans la résistance de charge. Une fois toute la charge collectée, la capacité se décharge dans la résistance en $\exp(-t/RC)$ et la tension retourne à 0.

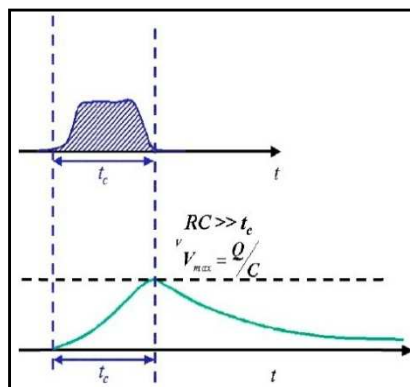


Figure 4.5 : détecteur à constante de temps longue

Le temps requis pour que l'impulsion atteigne son maximum, est uniquement déterminé par le temps de collection intrinsèque du détecteur. En revanche, le temps de décroissance du signal lui ne dépend que des caractéristiques du circuit de charge.

Si Q est proportionnelle à l'énergie déposée par la particule dans le détecteur. Alors la hauteur de l'impulsion reflète directement cette énergie.

Ce mode de fonctionnement peut s'avérer impraticable à haut taux de signaux à cause du temps de décroissance engendré par la grande valeur de RC qui favorise l'apparition d'empilement d'impulsions. En pratique, on recherche une constante de temps RC qui soit le meilleur compromis possible entre une spectrométrie très précise et la mesure de taux d'interactions élevés.

4.3. Modes de fonctionnement du détecteur

4.3.1. Le temps mort (*Dead Time*)

Quelles que soient les qualités du détecteur et de l'électronique associée, la chaîne de comptage ne peut intégrer toutes les informations qui lui viennent de la source radioactive.

La rapidité de sa réponse a des limites. Le temps qui doit séparer deux événements successifs pour qu'elle les prenne en compte est appelé "**temps mort**" (*Dead Time*). Pendant ce temps, la chaîne n'est plus en mesure de distinguer les événements qui se succèdent. Certains événements échappent à la mesure, il y a des pertes de comptage.

La probabilité de voir ce phénomène se manifester est liée au flux des particules détectés.

Négligeable pour les très faibles flux, il va prendre de l'ampleur au fur et à mesure de l'augmentation du flux.

Deux modèles permettent de rendre compte du phénomène et de les corriger :

4.3.1.1. Le modèle non paralysable

A partir de l'instant où un événement est pris en compte par la chaîne de mesure, rien n'est plus compté avant que ne s'écoule un temps égal à τ (*temps mort*). Tout se passe comme si un temps de récupération, le temps mort, était nécessaire au système pour prendre en compte un nouvel événement. Ceci correspond au modèle "*non paralysable*".

Pour ce modèle, le taux de comptage réel est de la forme :

$$N_r = \frac{N_c}{1 - \tau \cdot N_c} \quad \text{ou} \quad N_c = \frac{N_r}{1 + \tau \cdot N_r} \quad (4.2)$$

N_r représente le taux de comptage réel ou corrigé, N_c le taux de comptage mesuré

4.3.1.2. Le modèle paralysable

Dans le modèle paralysable, tout événement entraîne un temps de récupération même s'il intervient pendant τ . La relation entre le taux de comptage réel ou corrigé et le taux de comptage mesuré devient :

$$N_c = N_r e^{-N_r \tau} \quad (4.3)$$

Pour les 02 modèles, lorsque le produit $N_r \times \tau$ est très petit (ou encore $N_r \ll 1/\tau$), on peut utiliser une même formulation :

$$N_c = N_r (1 - N_r \times \tau) \quad (4.4)$$

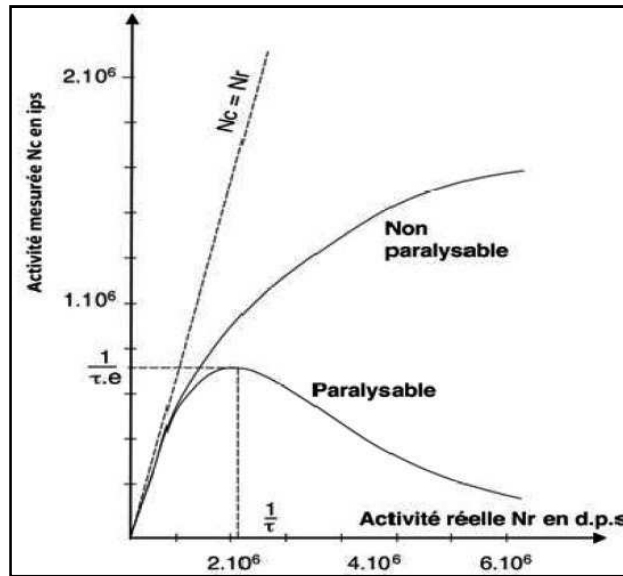


Figure 4.6 : Pertes de comptages selon le modèle paralysable et non paralysable

4.3.2. Mesure du temps mort

4.3.2.1. Méthode d'une source radioactive de courte période

La technique la plus simple pour calculer τ consiste à utiliser une source radioactive de courte période (*quelques dizaines de minutes*) et de mesurer son activité en fonction du temps.

Pour un modèle de type paralysable, on utilisera la formulation :

$$\lambda t + \text{Ln}N_c = N_o \cdot \tau \cdot e^{-\lambda t} + \text{Ln}N_o \quad (4.5)$$

Où λ est la constante radioactive du radioisotope utilisé, N_c le taux de comptage mesuré et N_o le taux de comptage mesuré au temps t_o initial. Et pour modèle de type non paralysable, on utilisera la formulation :

$$N_c \cdot e^{-\lambda t} = -N_o \cdot \tau \cdot N_r + N_o \quad (4.6)$$

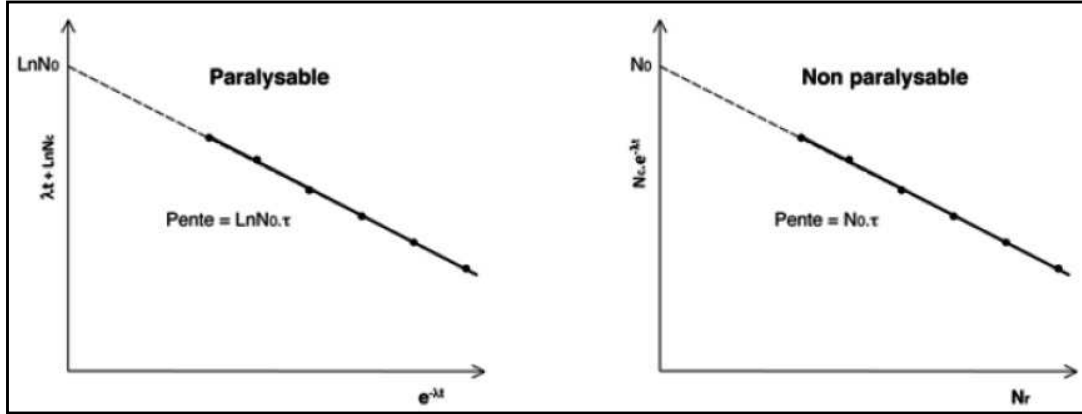


Figure 4.7 : Détermination du temps mort par la méthode de décroissance

4.3.2.2. Méthode de deux sources radioactives

Cette méthode consiste à comparer la somme des taux de comptage pour 02 sources radioactives isolées d'activités relativement faibles, au taux de comptage pour l'ensemble des deux sources radioactives (*considéré comme relativement élevé*). Ce dernier taux est plus faible que la somme des 02 taux partiels puisque les pertes sont alors plus importantes. Soient M_1 , M_2 et M_{12} les nombres d'événements ionisants enregistrés par le détecteur, par unité de temps, respectivement pour la source radioactive 1, la source radioactive 2 et l'ensemble des deux sources radioactive 1 et 2.

Les taux de comptages correspondants sont donnés par :

$$C_1 + C_2 = C_{12} \quad (4.6)$$

D'après la relation de correction du temps mort, on peut avoir :

$$M_1/(1 - \tau \cdot M_1) + M_2/(1 - \tau \cdot M_2) = M_{12}/(1 - \tau \cdot M_{12}) \quad (4.7)$$

Si les taux de comptages sont suffisamment faibles pour que les $\tau \cdot M$ soient petits vis-à-vis de l'unité. On peut approximer τ à :

$$\tau = (M_1 + M_2 - M_{12}) / (M_{12}^2 - M_1^2 - M_2^2) \quad (4.8)$$

4.3.3. Résolution en énergie d'un détecteur

La résolution en énergie R d'un détecteur est par convention définie comme la largeur à mi-hauteur du pic (*Full Width at Half Maximum - FWHM*) divisée par la position du centroïde du pic H_0 (généralement assimilé à une Gaussienne). R est exprimée en %.

La résolution en énergie mesure la capacité d'un détecteur à séparer les raies dans le spectre.

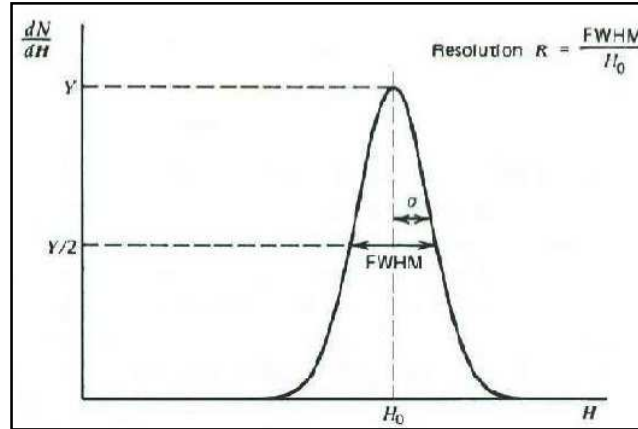


Figure 4.8 : Définition de la résolution pour un pic parfaitement gaussien

Pour une distribution gaussienne on a :

$$FWHM = 2 \times \sqrt{2\ln 2} \times \sigma = 2.35 \times \sigma \quad (4.9)$$

Où σ est l'écart type

La réponse des détecteurs est approximativement linéaire, donc $H_0 \approx K \times N$ avec N couples de porteurs en moyenne créés et K une constante, représentant l'énergie moyenne nécessaire pour créer un couple de particules.

$FWHM$ se déduit à :

$$FWHM = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{2.35\sigma}{H_0} = \frac{2.35K\sqrt{N}}{kN} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \quad (4.10)$$

R diminue si N augmente donc R diminue si K diminue. La bonne résolution d'un détecteur est obtenue avec N très grand, et l'énergie moyenne nécessaire K pour créer une paire de porteurs de charge est faible.

4.3.4. Efficacité géométrique d'un détecteur

La géométrie de comptage indique, d'une manière générale, la relation spatiale qui existe entre la source de rayonnement et le détecteur. Ce terme englobe aussi bien la géométrie de la source elle-même, que sa position par rapport au détecteur ou encore la géométrie de la zone de détection.

On distingue 02 types d'efficacités :

4.3.4.1. L'efficacité absolue

Elle dépend des propriétés du détecteur et de la géométrie de détection.

$$\varepsilon_{\text{abs}} = \frac{\text{nombre d'impulsions enregistrées}}{\text{nombre de rayonnements émis par la source}} \quad (4.11)$$

4.3.4.2. L'efficacité intrinsèque

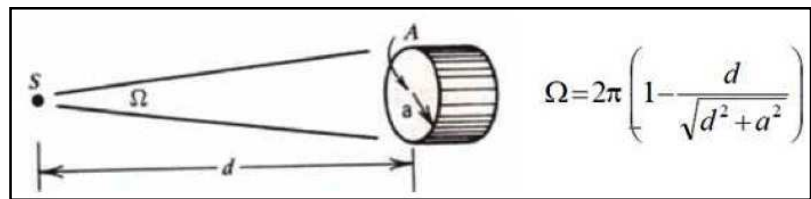
Elle dépend des propriétés du détecteur et est exprimée par la relation :

$$\varepsilon_{\text{int}} = \frac{\text{nombre d'impulsion enregistrées}}{\text{nombre de rayonnements incidents sur le détecteur}} \quad (4.12)$$

Pour une source isotrope, l'efficacité intrinsèque d'un détecteur devient :

$$\varepsilon_{\text{int}} = \varepsilon_{\text{abs}} \left(\frac{4\pi}{\Omega} \right) \quad (4.13)$$

Comme illustration, pour une source ponctuel et isotrope et un détecteur cylindrique de rayon a et distante de d par rapport à la source, l'angle solide est :



$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right) \quad (4.14)$$

Figure 4.9 : Le détecteur et la notion élémentaire d'angle solide

4.4. Autres caractéristiques des détecteurs

4.4.1. La réponse géométrique

L'angle d'incidence des rayonnements, s'il n'est pas appelé à être constant (cas des mesures sur le terrain) ne doit avoir que peu d'influence sur la réponse du détecteur ; on cherchera en pratique à avoir des détecteurs aussi isotrope que possible.

4.4.2. La stabilité en réponse et de l'information dans le temps

Un détecteur doit avoir une réponse qui ne varie que très peu dans le temps. Pour des détecteurs, tels que des dosimètres, qui enregistrent une somme globale d'informations élémentaires, il est essentiel que cette information ne se perde pas progressivement (phénomène de '*fading*').

4.4.3. L'équivalence au milieu dans lequel nous souhaiterions véritablement faire la mesure

En dosimétrie ou en radioprotection, nous utilisons les détecteurs constitués des matériaux dont la composition se rapproche le plus possible de celle des tissus vivants.

4.4.4. La transparence à son propre signal

Elle est notamment importante pour les scintillateurs qui peuvent être, soient transparents à leur propre lumière, soient perturbées par l'ajout de substances en leur sein (scintillation liquide phénomène de '*quenching*').

Plus généralement, un détecteur et sa chaîne de mesure associée, doivent avoir les mêmes qualités que celles recherchées pour tout type de capteur physique : fidélité, justesse, rapidité, bon rapport signal sur bruit et insensibilité aux conditions extérieures (température, humidité, lumière, champs électromagnétiques...etc.).

4.5. Les détecteurs à gaz

Généralement, trois (03) types de détecteurs sont utilisés pour détecter les rayonnements ionisants : les détecteurs à gaz, les détecteurs à scintillation et les détecteurs aux semi-conducteurs.

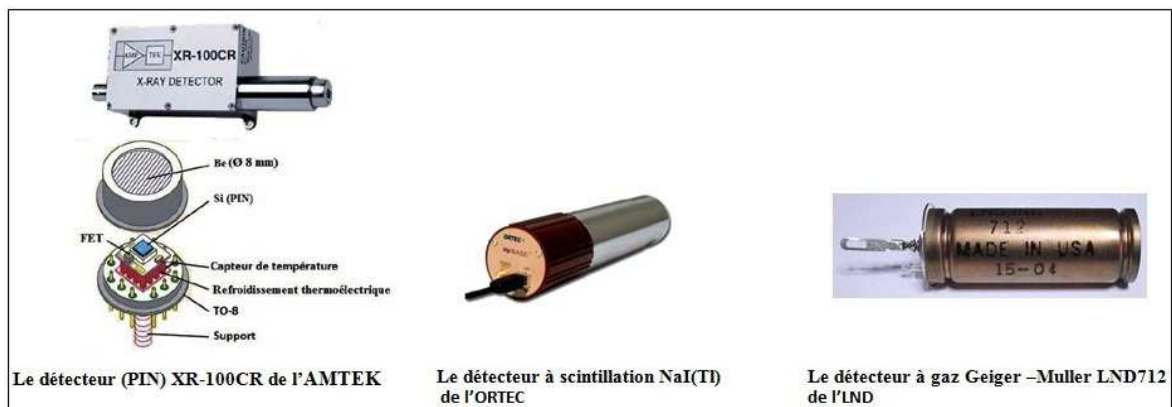


Figure 4.10 : Photos des détecteurs à semi-conducteur, à scintillation et à gaz

Comme on n'utilise que le détecteur à gaz dans ce travail, les deux (02) autres détecteurs des rayonnements ionisants ne sont pas introduits dans ce chapitre.

4.5.1. Principe d'un détecteur à gaz

Schématiquement un tel détecteur se compose d'une enceinte remplie de gaz dans laquelle plongent 02 conducteurs isolés électriquement appelés électrodes entre lesquels on établit un champ électrique. Lorsqu'une particule ionisante traverse le volume gazeux, elle crée un certain nombre de paires d'ions ; ces derniers sont entraînés par le champ et se dirigent vers l'une ou l'autre des électrodes suivant le signe de leur charge. Selon la nature et la pression du gaz ainsi que la valeur du champ électrique, le nombre et la nature des ions créés peuvent varier. Finalement, un certain nombre de charges sont recueillies par les électrodes. Elles constituent le signal transmis au sous-ensemble de mesure.

Ces détecteurs sont d'un emploi très étendu du fait de leur stabilité de fonctionnement dans le temps et sous des contraintes de rayonnement et température et d'autres caractéristiques telles qu'étendue de mesure, temps de réponse, adaptation à différents types de fonctionnement.

4.5.2. Energie moyenne nécessaire pour créer une paire d'ions

Pour créer une paire d'ions, il faut ioniser un atome du gaz, c'est-à-dire arracher un électron en dehors de la zone d'action du noyau, ce qui fait apparaître un corpuscule chargé négativement, l'électron et un ion positif.

L'énergie moyenne W pour créer une paire d'ions est la somme des énergies dépensées d'une part pour ioniser et d'autre part pour exciter. Cette énergie dépend très peu de la nature et de l'énergie de la particule.

Tableau 4.1 : Energie moyenne nécessaire pour créer une paire d'ions

Gaz	Energie par paires d'ions $W(\text{ev})$	1 ^{er} potentiel d'ionisation $I(\text{ev})$	Fraction de l'énergie utilisée à ioniser I/W
He très pur	46,0	24,5	0,58
N ₂	36,3	16,7	0,42
O ₂	32,2	12,8	0,38
Ar	26,4	15,7	0,59
BF ₃	33,8	10,25	0,28

4.5.3. Phénomènes entraînant la disparition des charges

4.5.3.1. La recombinaison

Quand les ions positifs et les ions négatifs sont en présence, ils ont tendance à se recombiner pour donner des molécules neutres. On distingue 03 sortes de recombinaison :

1. *La recombinaison différentielle* qui intervient entre un ion négatif et un ion positif provenant du même atome. Elle est indépendante de l'intensité du rayonnement.
2. *La recombinaison en colonnes* qui apparaît entre ions + et ions - d'atomes différents d'une même trace lorsque l'ionisation spécifique des particules ionisantes est très élevée. Elle est indépendante de l'intensité du rayonnement mais dépend du champ électrique.
3. *La recombinaison en volume* entre ions de traces différentes qui dépend de l'intensité du rayonnement.

4.5.3.2. L'attachement électronique

Dans les gaz rares parfaitement purs, les électrons restent libres. Mais, lorsque ces gaz contiennent des gaz électronégatifs tels qu'Oxygène, vapeur d'eau, Chlore, etc., les

électrons formés par ionisation ont tendance à se fixer sur les molécules d'oxygène, d'eau ou de chlore pour former des ions négatifs lourds de mobilité analogue à celles des ions positifs, donc approximativement 1000 fois plus faibles que celle des électrons.

La section efficace de capture des électrons par les molécules d'oxygène pour former des ions négatifs lourds est faible lorsque l'électron a une énergie inférieure à 1 eV environ.

L'addition de petites quantités d'azote ou de CO₂ à un gaz rare minimisera donc les effets des traces d'air dues à un dégazage insuffisant ou une légère fuite.

4.5.3.3. La charge d'espace

Dans certaines conditions, des ions de même signe peuvent s'accumuler dans une partie du volume gazeux. En général, cette dernière n'est pas nulle et sa présence peut entraîner une modification de la distribution du champ entre les électrodes.

4.5.3.4. La diffusion

Si la concentration des ions de différente nature dans le gaz qui les contient n'est pas uniforme, il résulte du gradient de concentration, un gradient de pression qui tend à uniformiser les concentrations ioniques. La diffusion est liée à l'agitation thermique des molécules du mélange. Les ions diffusent alors dans le gaz.

4.5.4. Classes de détecteurs à gaz

Soit V la différence de potentiel entre l'anode et la cathode d'un détecteur (*fil et cylindre coaxiaux, par exemple*). Pour des particules incidentes de nature et de vitesse données, C'est-à-dire des phénomènes ionisants identiques, le régime de fonctionnement est fonction de V . En prenant pour paramètre l'amplitude des impulsions, on met en évidence 05 zones de fonctionnement :

1) Dans la zone **I**, la tension V est très faible ; le champ électrique est faible, et les ions positifs, ainsi que les électrons formés par ionisation du gaz sont animés de petites vitesses : les ions et les électrons se recombinaient partiellement avant de pouvoir atteindre l'électrode collectrice. Aucun détecteur ne fonctionne dans ces conditions.

2) Au-dessus d'une certaine valeur V_s de la tension (*quelques centaines de Volts*), la recombinaison devient négligeable. Tous les ions positifs et négatifs sont collectés et la hauteur d'impulsion prend une valeur constante, quelque soit V ; le courant d'ionisation atteint sa valeur de saturation qui est proportionnel à l'énergie du rayonnement. C'est la région **II**, correspondant au fonctionnement en *chambre d'ionisation*.

3) Au-dessus d'une valeur V_p de la tension, commence à se produire, à l'intérieur du gaz, une augmentation du nombre d'ions, c'est-à-dire une amplification, due aux chocs des électrons libérés par l'ionisation de la particule incidente sur les molécules de ce gaz. Cette ionisation par chocs donne une impulsion dont l'amplitude, augmentant avec V , est proportionnelle au nombre total de paires d'ions produites par la particule à détecter. Cette

région **III-A** est celle de proportionnalité vraie. Fonctionnement des compteurs proportionnels.

4) Si l'on augmente encore V , la quantité d'ions produite par l'ionisation par chocs devient assez grande pour qu'il apparaisse une charge d'espace, tendant à diminuer la valeur du champ électrique, donc la hauteur de l'impulsion. Par contre, il se produit sur la cathode et dans le gaz des effets secondaires qui ont pour effet d'augmenter la hauteur d'impulsion et de propager partiellement la décharge le long du fil. On atteint la région **III-B** ou région de proportionnalité limitée. Dans cette région, la courbe prend une pente plus faible pour les particules très ionisantes. Pour une certaine tension V , les courbes correspondant à des particules de nature et de vitesse différentes viennent se rejoindre.

5) Au-dessus de cette tension V_G , appelée **seuil de Geiger**, l'avalanche électronique se propage tout le long de l'anode, et la hauteur d'impulsion est la même, quel que soit le nombre d'ions initiaux, c'est-à-dire quelle que soit la particule incidente. Le détecteur fonctionne alors en **régime de Geiger** et cette **région IV** appelée zone de résolution.

6) Enfin, au-dessus d'une tension V_m , le compteur devient instable et entre en régime de décharge semi-autonome.

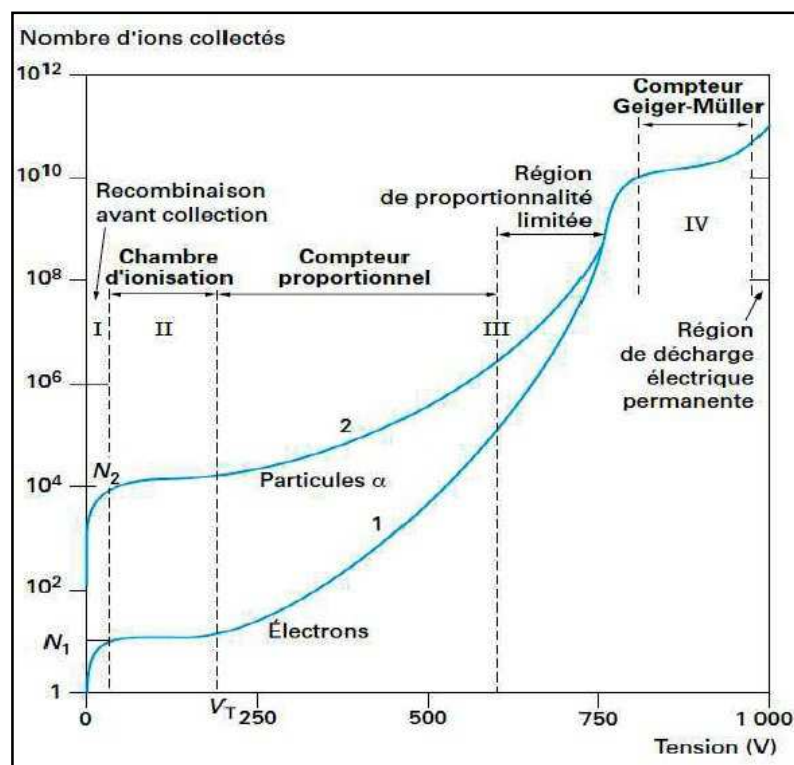


Figure 4.11 : régions de fonctionnement des détecteurs à gaz

4.5.4.1. La Chambre d'Ionisation

La chambre d'ionisation est caractérisée par le fait que leur fonctionnement ne comporte pas de processus de multiplication des électrons primaires. Ils fonctionnent dans la zone de

saturation (zone II). Dans cette zone le phénomène de recombinaison est négligeable. Toutes les charges créées sont collectées. Il existe plusieurs types de chambres qui dépendent de la nature des rayonnements collectés et du mode de fonctionnement. Du point de vue géométrie, on peut distinguer deux types :

- la géométrie plane constituées par des disques plans parallèles ; le champ électrique est dans ce cas, constant.

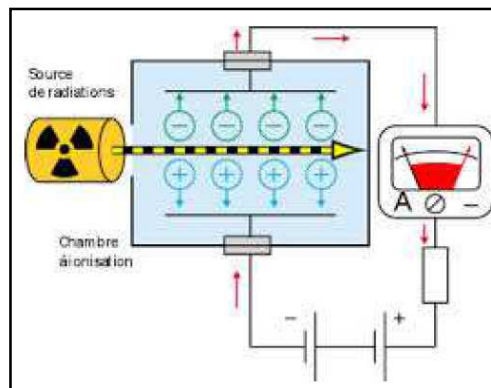


Figure 4.12 : Synoptique d'une Chambre d'Ionisation plans parallèles

La géométrie coaxiales ; le champ est alors inversement proportionnel à la distance à partir de l'électrode centrale.

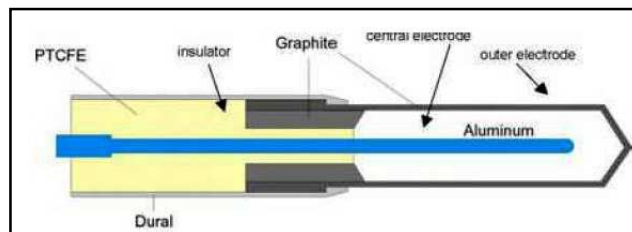


Figure 4.13 : Synoptique d'une Chambre d'Ionisation coaxiale

Le déplacement des ions et des électrons vers les électrodes donne naissance à un courant induit. Le courant prend naissance dès qu'électrons et ions commencent à migrer sous l'influence du champ électrique, et s'annule lorsque toutes les charges sont collectées. **La vitesse de migration ou de dérive** est proportionnelle à la quantité E/p où E est le champ électrique appliqué et p la pression du gaz.

$$V = \mu \frac{E}{p} \quad (4.15)$$

Pour les électrons, la mobilité μ est environ 1 000 fois plus grande que celle des ions, la vitesse de migration également. Si une chambre d'ionisation est soumise à une irradiation constante, le taux de création des paires ions-électrons compense exactement le taux d'ions-électrons collectés (*en supposant qu'il n'y ait pas de recombinaison ion-électron*).

dans le volume de la chambre et que l'efficacité de collection des ions et des électrons est totale).

Le courant d'ionisation est alors la mesure directe du taux de création ions-électrons dans la chambre. La chambre d'ionisation fonctionne ainsi en mode continu.

4.5.4.1.1. La Chambre d'Ionisation à paroi d'air

Cette chambre est utilisée pour la dosimétrie et spécialement pour la mesure de l'exposition X et le kerma dans l'air K_{air} pour les rayons X et gamma. Figure dessous.

$$K_{\text{air}} = X \left(\frac{W_{\text{air}}}{e} \right) \quad (4.16)$$

$$K_{\text{air}} = \frac{dQ}{dm} \left(\frac{W_{\text{air}}}{e} \right) \quad (4.17)$$

W_{air} : énergie de création d'un pair d'ions

Puisque le courant d'ionisation $I = dQ/dt$ et la masse d'air dm dans le volume de mesure $dm = \rho_{\text{air}} \times V$ avec R est rayon d'ouverture du diaphragme, on peut aboutir à la relation utilisée en pratique pour mesure du débit du kerma :

$$\dot{K}_{\text{air}} = \frac{I}{\rho_{\text{air}} \cdot V_m} \left(\frac{W_{\text{air}}}{e} \right) \quad (4.18)$$

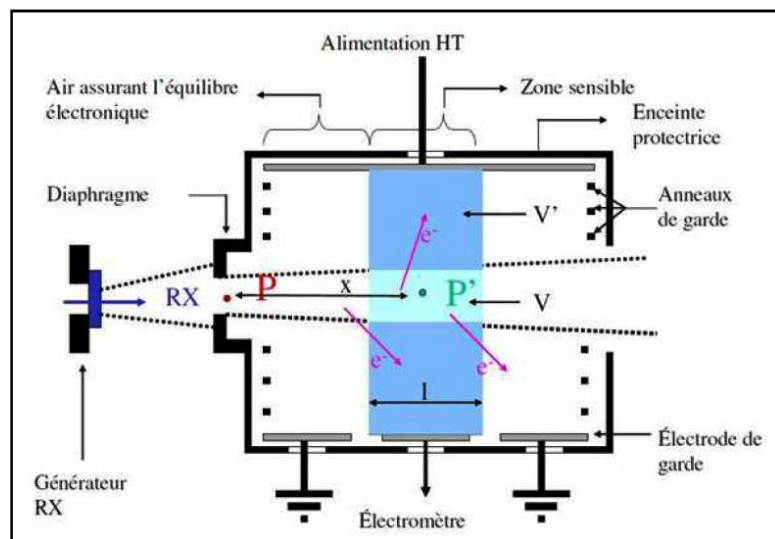


Figure 4.14 : Synoptique d'une Chambre d'Ionisation à parois d'air

4.5.4.1.2. La Chambre d'Ionisation à stylo

Dans les mesures de radioprotection du personnel, on emploie un type particulier de chambre d'ionisation qui fonctionne en mode intégration de charges créées par la particule incidente. Ces sont des chambres d'Ionisations associées à un électroscope en miniature appelées dosimètres. Ces intégrateurs indiquent la dose de rayonnement reçue dans un

volume donné pendant un certains temps. Schématiquement, ils sont constitués (*figure ci-dessous*) d'une électrode mobile (*fibre de quartz métallisée*) s'écartant d'une pièce fixe par répulsion électrostatique quand on charge l'ensemble.

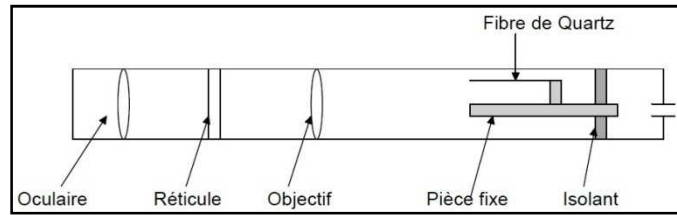


Figure 4.15 : Synoptique d'une Chambre d'ionisation à Stylo

Au fur et à mesure de l'ionisation du volume sensible, le système se décharge, la fibre mobile se rapproche de la partie fixe. Son déplacement est suivi à l'aide d'un petit microscope muni d'un réticule gradué en roentgens. L'ensemble se présente sous la forme d'un stylo.

4.5.4.2. Le Compteur proportionnel

Dans la **zone III-a**, l'amplitude du signal électrique est proportionnel au nombre d'ions créés par la particule dans le volume sensible. Cette énergie se déduit de l'amplitude de l'impulsion. D'où l'intérêt de tels détecteurs dans les mesures de physique fondamentale. Soit un compteur constitué par un cylindre négatif et un fil coaxial positif de petit diamètre. Supposons qu'une seule paire d'ions soit formée dans le volume sensible par la particule incidente. L'ion positif dérive lentement vers le cylindre, mais l'électron, beaucoup plus léger, arrive rapidement dans la région de champ intense entourant le fil, où, par chocs, il libère de nouveaux électrons et ainsi de suite. Il se produit autour du fil, dans une région limitée à une très faible distance du fil d'anode, une avalanche de Townsend. Soit n le nombre d'électrons ainsi créés.

L'atome auquel est arraché un électron, par choc, (*qui provient de la couche électronique périphérique*) possède souvent un excès d'énergie, car le choc peut placer un électron sur une couche virtuelle. Cet électron revient à sa place normale en restituant cette énergie sous forme d'un photon. Ce photon, par interaction avec un atome du gaz ou de la paroi, peut extraire un électron par effet photoélectrique. De plus, sans être ionisés, des atomes heurtés par des photons peuvent être placés dans des états excités ; ils restituent également cette énergie par l'émission d'un photon.

Soit donc, par électron de l'avalanche de Townsend, γ le nombre d'électrons secondaires produits (*γ est toujours très petit par rapport à l'unité*). Le nombre total A d'électrons finalement créés par la paire d'ions initiale est :

$$A = n + \gamma n^2 + \gamma^2 n^3 + \dots \quad (4.19)$$

γ est dépendant de la nature du gaz et des parois du détecteur, n dépendant de la différence de potentiel V entre les électrodes. Pour γn inférieur à l'unité, la série est convergente.

$$A = n / (n - \gamma n) \quad (4.20)$$

- Si n est petit, c'est-à-dire la tension de fonctionnement supérieure à V_p , mais assez faible, A est pratiquement égal à n : la proportionnalité est parfaite.
- Si n est plus grand, A est nettement supérieur à n et dépend du nombre total de paires d'ions produites par la particule : on se trouve dans la zone de proportionnalité limitée.

A est le coefficient d'amplification dans le gaz. C'est une caractéristique fondamentale du fonctionnement du compteur.

4.5.4.2.1. Les courbes caractéristiques d'un Compteur proportionnel

- La Courbe de discrimination

C'est la relation entre le taux de comptage, obtenu avec un sous-ensemble de mesure et le seuil de discrimination, les autres caractéristiques du sous-ensemble telles que tension, gain, bande passante, constantes de temps restant fixes. Les différents points de cette courbe indiquent le nombre d'impulsions par seconde dont l'amplitude est supérieure à la valeur indiquée en abscisse.

- Le Spectre d'impulsions

C'est la courbe différentielle de la précédente, qui donne le nombre d'impulsions par seconde dont l'amplitude est comprise entre deux valeurs de discrimination. Les sélecteurs d'amplitude donnent directement cette courbe.

- La Courbe de palier

Pour un seuil de discrimination fixé, cette courbe donne le nombre d'événements par seconde en fonction de la haute tension appliquée. Elle détermine la zone de fonctionnement d'un compteur proportionnel (*Figure 4.16 ci-dessous*).

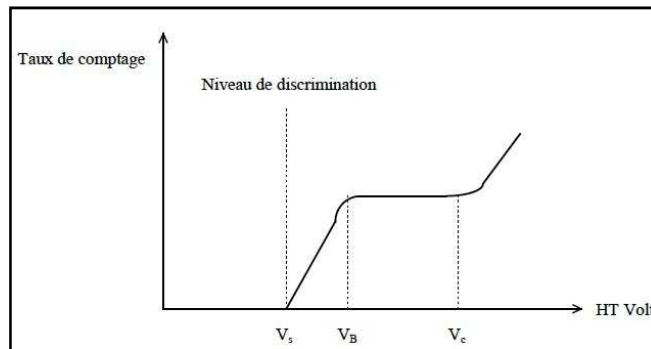


Figure 4.16 : La courbe de palier d'un Compteur Proportionnel

4.5.4.3. Le Compteur Geiger-Muller

Bien que la structure et la forme de ce détecteur à gaz soit semblable à celles d'un compteur proportionnel, le champ électrique entre les électrodes est tellement élevé que le facteur $n\delta$ devient presque égal à 1. Le coefficient d'amplification A est très grand. La zone de fonctionnement de ce type de détecteur se trouve dans **la zone IV**.

Dans cette zone, une seule paire électron-ion suffit à provoquer une succession d'avalanches. En réalité, le compteur GM ne s'arrête pas de produire des impulsions même après la diminution de la tension de polarisation suite à l'accumulation des charges positives autour de l'anode. En effet, ces charges, lorsqu'elles atteignent la cathode, produisent des photons par chocs qui, à leur tour, provoquent d'autres impulsions.

Il existe 02 méthodes pour arrêter les décharges successives ; le procédé par extinction interne et celui de l'extinction externe :

4.5.4.3.1. L'extinction externe

Pour arrêter les avalanches successives, l'idée est de diminuer la tension de polarisation de façon notable durant la production de l'impulsion. Le procédé consiste à faire passer l'impulsion de courant à travers une résistance de grande valeur R (figure 4.17 ci dessous) qui a pour effet de réduire la tension de polarisation ($V_0 - i_d \times R$).

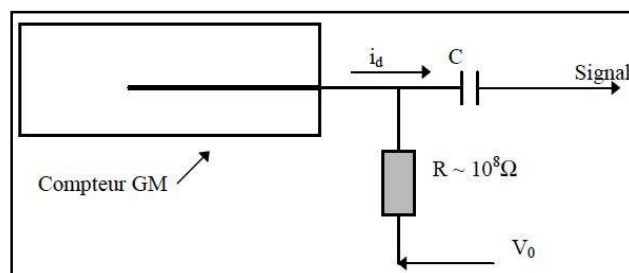


Figure 4.17 : Représentation d'un détecteur GM en méthode d'extinction externe

D'autre part la constante de temps RC (C représente la capacité entre l'anode et la masse) doit être choisie de façon à ce qu'elle soit supérieure au temps de collection des ions.

Durant cette période, le compteur GM sera inopérant. Cette période s'appelle le temps mort du compteur.

4.5.4.3.2. Gaz auto coupeur (extinction interne)

L'extinction par procédé interne est provoquée par l'addition au gaz de remplissage de petites quantités de gaz halogène ou gaz organique polyéthylène. Leurs molécules ont la faculté de se dissocier après interaction avec les électrons et n'émettent pas de photons. De cette façon, le nombre de photoélectron est réduit considérablement.

4.6. Electronique associé au détecteur

4.6.1. La chaîne de mesure spectrométrique

On rappelle qu'un détecteur délivrant une information électrique peut fonctionner en impulsion ou en courant. Le mode impulsion est étudié pour produire les spectres énergétiques des rayonnements détectés en associant au détecteur un ensemble d'éléments électroniques (*chaîne de mesure*).

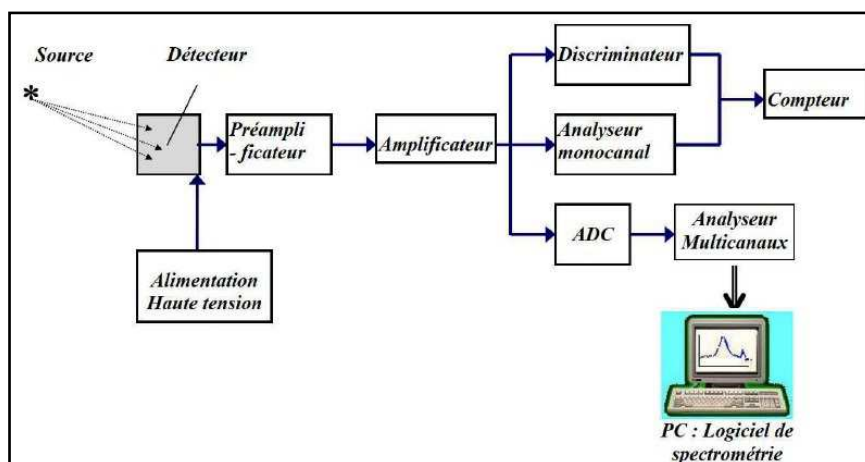


Figure 4.18 : La chaîne de mesure spectrométrique

4.6.2. La Composition de la chaîne de mesure

4.6.2.1. L'alimentation haute tension

L'alimentation haute tension est un élément indispensable quel que soit le détecteur. Dans le cas où on emploie des tensions peu élevées ou qui n'ont pas besoin d'être très stables. Dans la très grande majorité des cas on utilise des alimentations électroniques qui doivent remplir les conditions suivantes:

- être réglables pour les tensions imposées par les détecteurs.
- pouvoir supporter, sans chute de tension, le courant débité par le détecteur.
- être stabilisées à hauteur de l'exigence des détecteurs.
- ne pas présenter de dérive au cours du temps ;
- avoir un bruit très faible.

4.6.2.2. Le préamplificateur

En général on a besoin d'éloigner le détecteur de l'électronique de traitement; on dispose un préamplificateur au plus près du détecteur pour:

- récupérer le maximum de signal
- réduire le bruit
- minimiser les effets capacitifs
- adapter l'impédance élevée du détecteur avec la basse impédance du câble coaxial de transport du signal puis de l'électronique de traitement
- effectuer une première mise en forme du signal (*production de l'impulsion à traiter*)
- amplifier avec un gain fixe

4.6.2.3. L'amplificateur

Placé à la suite du préamplificateur, l'amplificateur a pour fonction de multiplier dans un rapport donné ajustable (*le gain*) l'amplitude du signal qu'il reçoit. Le gain doit être linéaire sur la totalité de la dynamique des signaux d'entrée ; il peut dans certains cas atteindre des valeurs de 200.000. L'amplificateur contribue à la mise en forme finale du signal en vue de son analyse ou de son traitement. Il permet des réglages tels que la restauration de ligne de base, la compensation de pôle zéro (*élimination de l'"undershot" final engendré par la mise en forme des impulsions*). Il permet également le rejet des empilements, en liaison avec l'analyseur multicanaux.

La mise en forme des impulsions est très importante pour améliorer les paramètres tels que temps de résolution, résolution en énergie, rapport signal sur bruit, et pour pouvoir traiter les signaux dans les modules électronique. Cette mise en forme s'effectue généralement à l'aide d'une série de circuits intégrateurs (*RC ou filtre passe-bas*) et différentiateurs (*CR ou filtre passe-haut*) qui peuvent notamment conduire à des mises en forme semi gaussiennes. Les impulsions engendrées peuvent être bipolaires, unipolaires, négatives ou positives.

Une bonne mise en forme de signaux permet de minimiser les empilements (*superpositions d'impulsions*) à haut taux de comptage qui viennent perturber le dénombrement des impulsions ainsi que la mesure de leur amplitude.

4.6.2.4. Le discriminateur

Un discriminateur produit un signal logique si une impulsion dépasse une valeur de seuil réglable. Il permet la construction de spectres d'amplitudes d'impulsions en mode "*intégral*". Il est fondé sur le principe du monostable et sert souvent à éliminer la contribution du bruit de fond aux mesures.

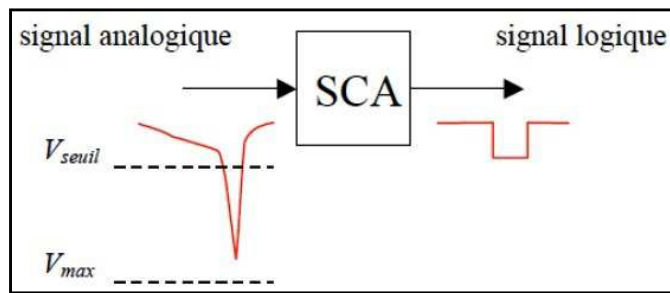


Figure 4.19 : Synoptique de fonctionnement d'un discriminateur

4.6.2.5. L'analyseur monocanal

L'analyseur ou sélecteur monocanal est fondé sur le principe suivant (*voir Figure 2*): 02 discriminateurs bas associés à une fonction d'anticoïncidences permettent de ne prendre en compte que les impulsions dont l'amplitude est comprise dans une fenêtre définie comme l'écart entre les 02 seuils de discrimination. Il engendre une impulsion logique lorsque l'amplitude de l'impulsion analogique à l'entrée est comprise dans la fenêtre. En balayant avec 01 fenêtre constante l'ensemble des valeurs du seuil bas, on peut reconstituer un spectre d'amplitudes d'impulsions proportionnelles aux énergies cédées dans le détecteur.

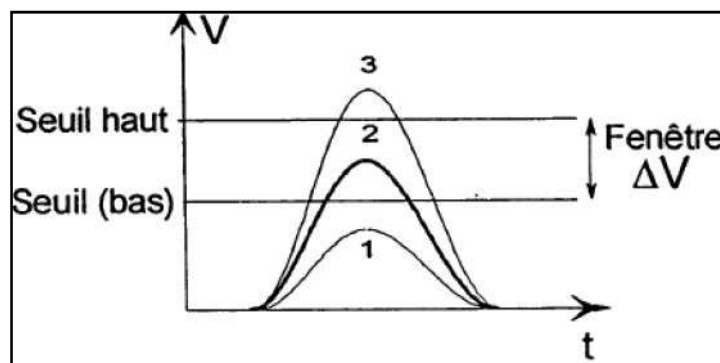


Figure 4.20 : principe de fonctionnement d'un analyseur monocanal

4.6.2.6. L'analyseur multicanal

Dans certaines applications de spectrométrie, pour que le sélecteur monocanal soit efficace et intéressant, il faut que la largeur du canal (*fenêtre de mesure*) soit faible, sinon il risque de ne pas pouvoir restituer correctement la forme des pics. De plus, si le taux d'impulsions est faible ou le phénomène à mesurer peu durable, le sondage de l'ensemble du spectre peut demander beaucoup trop de temps. On utilise alors des analyseurs multicanaux que l'on peut en théorie considérer comme une somme de nombreux analyseurs monocanaux contigus bien qu'ils soient quasiment toujours conçus sur un principe complètement différent. Un analyseur multicanaux comprend un codeur analogique-numérique, une mémoire divisée en segments, aussi appelés canaux, et un écran de visualisation.

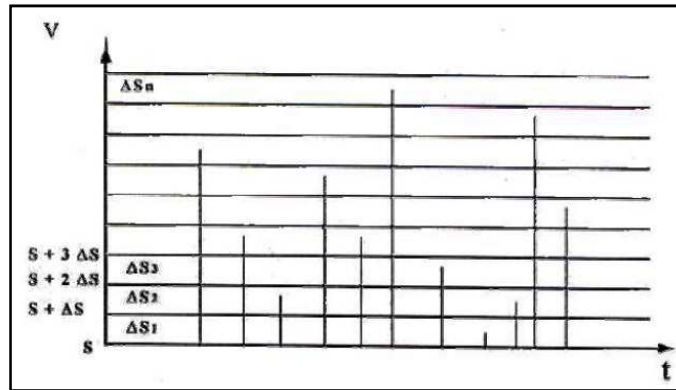


Figure 4.21 : principe de fonctionnement d'un analyseur multicanal

Ces éléments permettent respectivement de convertir les tensions électriques en nombres, de classer ces nombres dans les canaux de mémoire, et de visualiser les contenus de l'ensemble des canaux c'est à dire la représentation du spectre sur l'écran. Cette visualisation finale s'effectue grâce à un système incorporé ou bien en liaison avec un micro-ordinateur.

Les pics, les étalonnages, les calculs, les identifications des nucléides et la stabilisation de spectres par surveillance des pics est également possible.

Les analyseurs multicanaux peuvent aussi fonctionner en **multi échelle** (*enregistrement d'événements dans les canaux mémoire dont la largeur de chacun correspond à un intervalle de temps donné*).

Le nombre de canaux mémoire va couramment de 512 à 16384. Le choix de ce nombre doit résulter du compromis entre la précision souhaitée dans le spectre et le temps d'acquisition nécessaire (*on met beaucoup plus de temps à quitter les fluctuations statistiques au niveau du bruit de fond avec un grand nombre de canaux*).

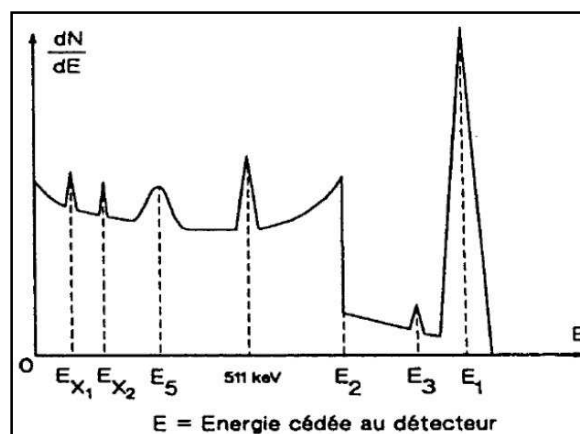


Figure 4.22 : Spectre visualisé sur un analyseur multicanal (MCA)

Tableau 4.2 : Spectre hypothétique

<i>Energie:</i>	<i>Phénomène correspondant:</i>
E_1	Pic d'absorption totale
$[0, E_2]$	Fond Compton continu
E_2	Front Compton
$[E_2, E_1]$	Vallée Compton
E_3	Raie d'échappement X caractéristique détecteur
511 keV	Pic d'annihilation (si source β^+)
E_5	Pic de rétro diffusion
E_{X1} et/ou E_{X2}	Pics X de la source et/ou de l'environnement

Chapitre 5 : Réalisation d'un prototype de robot de mesure à distance de la radioactivité

5.1. Présentation du prototype

Comme on a déjà indiqué dans l'objectif du travail présenté dans le résumé au début de cette thèse, le prototype du robot véhicule réalisé doit être semi-autonome (télécommandé) capable d'abord de détecter et d'effectuer en permanence des mesures à distance de la radioactivité ou de rayonnement ionisant. Donc, ce robot doit être équipé d'un détecteur des rayonnements ionisants, d'un système de localisation par odométrie, d'un système de détection d'obstacle ou d'anticollision, d'un système de communication radio pour effectuer des échanges des données avec son téléopérateur, ainsi que d'une caméra de surveillance pour la reconnaissance d'un objet suspect et mieux voir l'environnement auquel il s'évalue. Les deux figures 5.1 et 5.2 ci-dessous résument le synoptique du système ainsi que les principaux composants et modules qu'on devrait utiliser pour réaliser le robot véhicule radiocommandé.

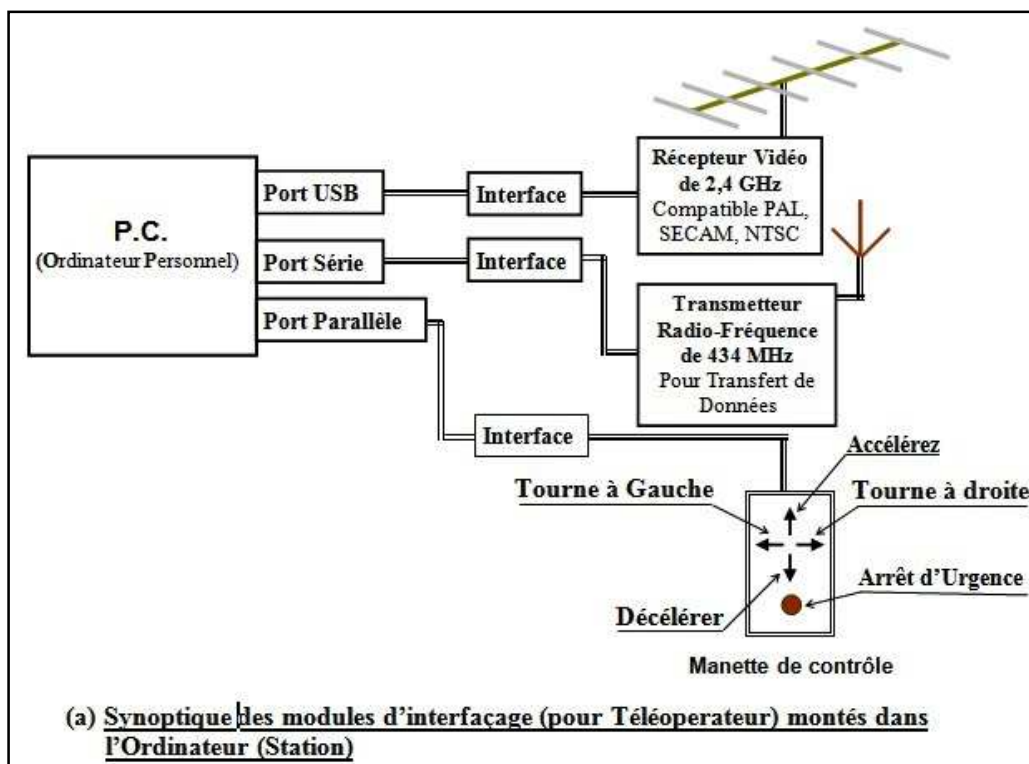


Figure 5.1 : Synoptique des modules d'interfaçage montés dans l'Ordinateur

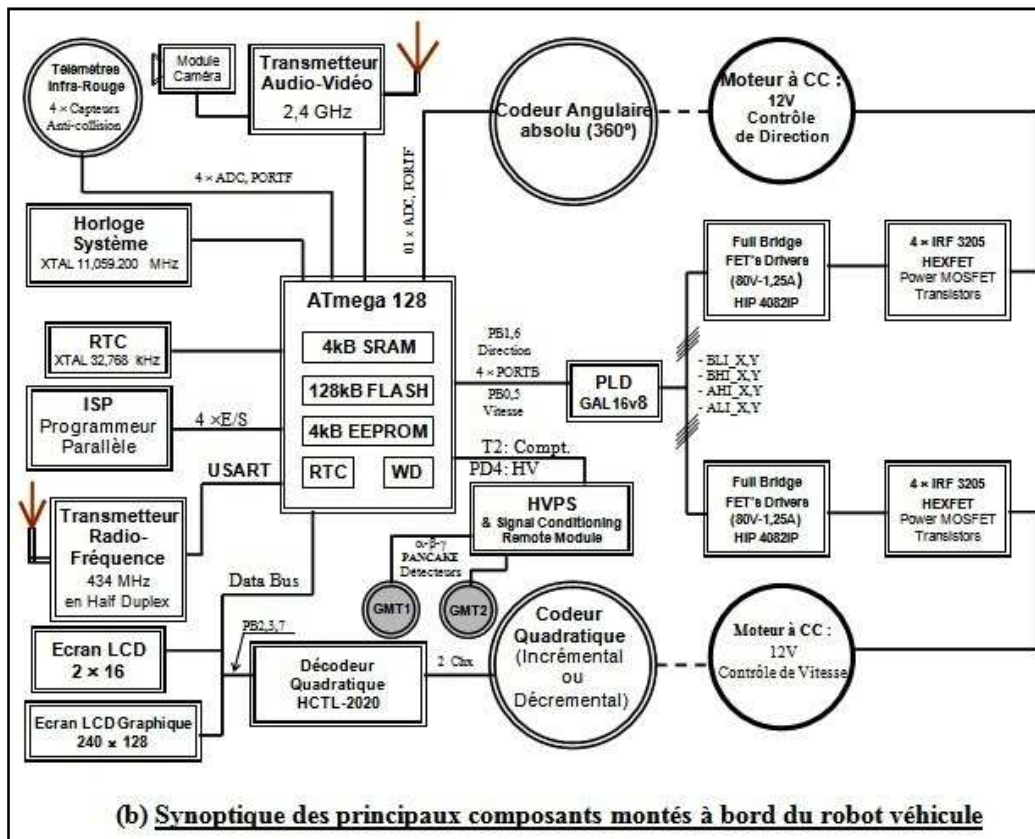


Figure 5.2 : Synoptique des principaux composants montés à bord du robot véhicule

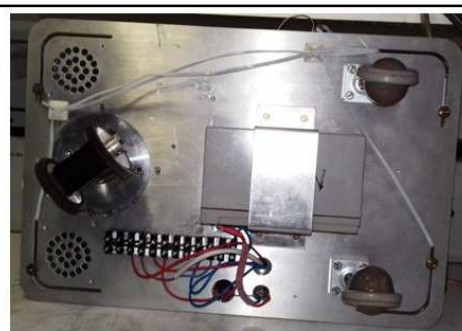
5.1.1 L'Aspect mécanique du prototype

Comme encore au stage d'expérimentation, l'environnement dans lequel évolue ce prototype est le sol horizontal cimenté du laboratoire de Madagascar – INSTN, ayant $30 \times 25m^2$ de surface. Considérant ceci, le robot mobile réalisé est de type tricycle de traction avant.

La mécanique de la plateforme Robot – Véhicule est relativement simple. Elle est formée d'un châssis épais en alliage d'acier rectangulaire de 10 mm d'épaisseur et de $450mm \times 300mm$ de dimension sur lequel sont fixées ses deux (02) roues en arrière, et d'une (01) troisième roue avant motrice orientable. La figure 5.3 suivante montre la vue de dessus et la vue de dessous du prototype réalisé.



(a)- Vue de dessus de la plate forme



(b)-Vue de dessous de la plate forme

Figure 5.3 : Photos de présentation globale du prototype réalisé

Le poids total de ce prototype est de 10Kg. Pour être autonome en énergie, ce robot fonctionne sur une batterie. Les différents circuits électroniques, les détecteurs, les capteurs et les actionneurs montés abord de la plateforme nécessitent des tensions et des courants d'alimentation différents. Deux (02) moteurs à courant continu de +12VDC - 03Nm - 2900rpm dont l'une pour l'orientation et vitesse et l'autre pour direction, sont mécaniquement montés sur l'axe verticale de la roue avant de cette véhicule.

Une batterie de +12VDC – 7Ah est montée en dessous de châssis de ce prototype pour alimenter les cartes électroniques (*carte logique de commande et de contrôle, carte de puissance pour les moteurs, carte de détection de la radioactivité*) ainsi que le camera de surveillance, les capteurs, les actionneurs et transmetteurs qui sont montés abord de ce véhicule.

5.1.2 L'Aspect électronique du prototype

L'électronique de ce robot est conçue et réalisé sous formes de multicartes. Ces cartes se connectent entre eux par l'intermédiaire des nappes de câbles ou des câbles (*pour les alimentations*).

Le logiciel **EAGLE** (Easy Applicable Graphics Layout Editor) a été utilisé pour le traçage des schémas et la réalisation de ses circuits imprimés [6]. Les circuits imprimés de ce prototype sont toutes réalisées en doubles faces. Ces cartes sont :

- la carte à microcontrôleur ATmega128-16
- la carte de puissance pour la commande et le contrôle de deux (02) moteurs
- la carte de détection de la radioactivité
- la carte de pilotage (*driver*) de la manette de jeu

5.1.2.1. L'électronique de contrôle et de commande

Cette partie logique de contrôle et de commande est basée sur un microcontrôleur 8 bits, appelé ATmega128-16, de la compagnie Atmel®[5]. Elle est formée de deux (02) cartes électroniques dont :

- La première (1^{ère}) carte constitue le système minimum à base de la version ATmega128-16. Cette platine en époxy de $46 \times 37\text{mm}^2$ insérable dispose en ses deux (02) cotés latéraux toutes les 64 broches ou Pins du microcontrôleur ATmega128-16. Elle est présentée dans la figure 5.4 ci-dessous.

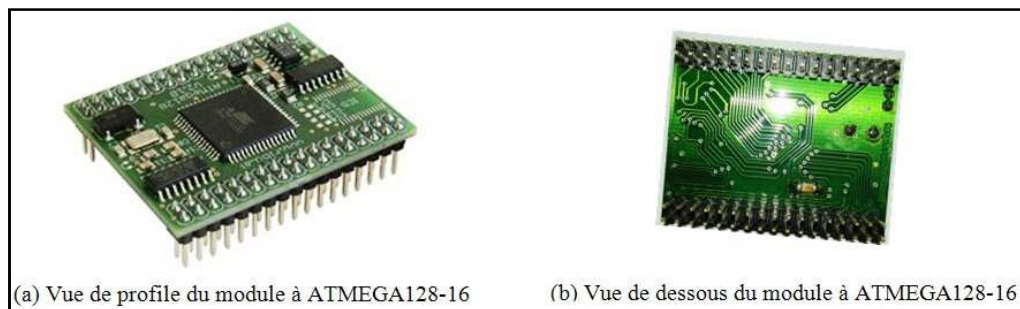


Figure 5.4 : Photo du module de base à ATmega128-16

Le schéma électronique de ce système minimum à ATmega128-16 est présenté dans la figure 5.5 ci-dessous.

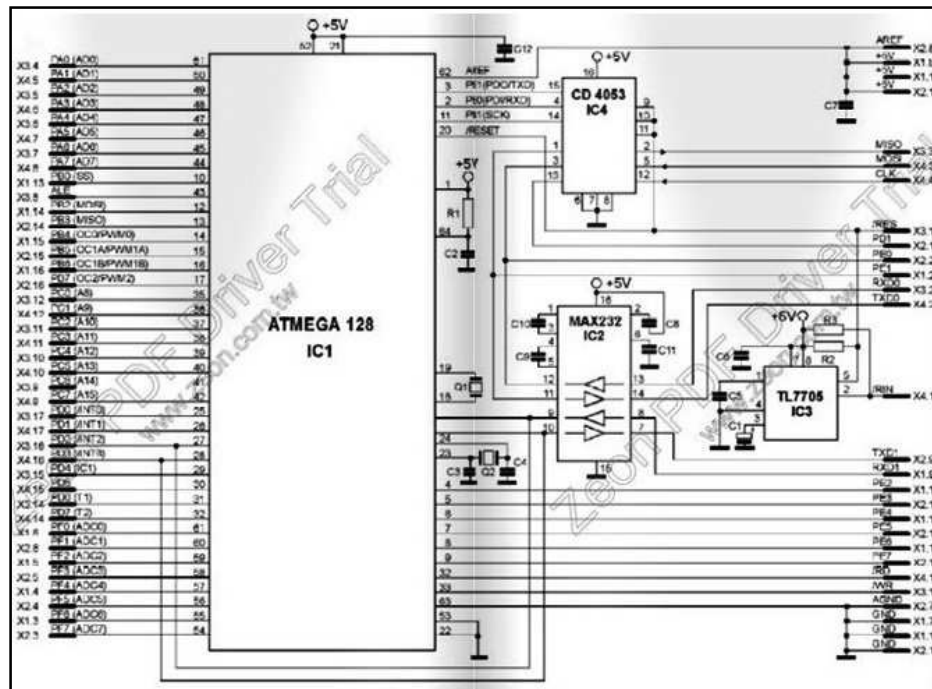
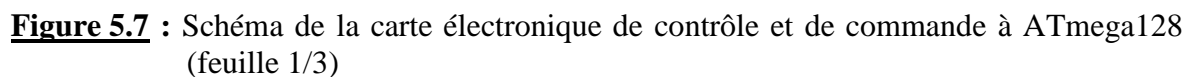


Figure 5.5 : Le schéma électronique de ce système minimum à ATmega128-16

L'horloge à oscillateur de ce système est fournie par un quartz de 11,059200MHz. L'horloge à oscillateur du Timer en temps réel (RTC) est assurée par un cristal de 32,768kHz connecté entre le pin 18 (TOSC2/PortG3) et pin 19 (TOSC1/PortG4) de l'ATmega128-16. Le reset / la remise à zéro ou l'initialisation du circuit est assuré par un circuit intégré superviseur d'alimentation TL 7705. Le circuit intégré CD4053 est un triple multiplexeur / démultiplexeur analogique à 02 canaux qui sert à commuter ou à multiplexer les données de l'"ISP - Programmer STK 300" avec les deux (02) interfaces série USART (RXD0/TXD0, RXD1/TXD1) à travers le circuit intégré d'interfaçage MAX232 qui assurent la communication entre l'ordinateur de contrôle et ce prototype de robot-véhicule.

- Deux (02) connecteurs femelles de type FH217 (*barrette double femelle au pas de 2,54mm*) distant de 27,94mm sont soudés dans la deuxième carte nommée ROBOT-VEHICLE_CONTROLLER_BOARDAv2 pour insérer ce module de base à ATmega128-16. Cette deuxième carte est aussi formée de deux (02) convertisseur de tension continu en tension continu (*DC – DC Converters*) TEN1211 qui transforment la tension délivrée par la batterie de 12V – 7Ah en +5V - 1A. Le convertisseur IC7 sert pour alimenter l'ensemble des circuits montés abord du prototype. Tandis que le deuxième (2^{ième}) convertisseur IC8 est utilisé pour alimenter uniquement le module transmetteur radiofréquence "WIZ-SML-IA" qui assure des échanges informations à distance entre le robot-véhicule et l'ordinateur de contrôle placé dans un centre de commande et de contrôle. Un circuit intégré régulateur de tension précise REF02Z (IC6), monté dans cette deuxième (2^{ième}) carte, délivre la tension continue dite de référence de +2,5V très stable au pin 62 /AREF qui est l'entrée de

Figure 5.6 : Schéma de la carte électronique de contrôle et de commande à ATmega128
(feuille 3/3)



Comme montre la figure 5.7 précédente, cette première (1^{ère}) feuille (1/3) du schéma électronique de cette deuxième (2^{ème}) carte contient :

- Un (01) connecteur femelle de 1 × 20 broches (SV2) qui est soudé sur cette carte pour optionnellement connecter un afficheur LCD graphique parallèle PG 240128-A (128 lignes de 240 colonnes) de la société POWERTIP®.
- Un (01) connecteur femelle de 1 × 16 broches (J3) qui est aussi soudé sur cette deuxième carte pour optionnellement connecter un afficheur LCD parallèle PVC160203P (2 lignes de 16 caractères). Son circuit d'adressage est composé d'un circuit intégré 74HC00AN (IC1), d'une (01) résistance R1, un (01) condensateur C1, et une (01) diode D1. Le potentiomètre R2 est utilisé pour le réglage manuel de contraste de cet afficheur LCD.
- Le décodeur Quadratique HTCL-2020 (IC3), un circuit intégré compteur /décompteur à 16 bits, moins de son circuit oscillateur composé d'un (01) circuit intégré 74HC02 (IC2), deux (02) résistances R4 et R5 et deux (02) condensateurs C2, C3 sont montés dans cette deuxième (2^{ème}) carte pour déterminer ou localiser la position du robot-véhicule. Et le connecteur femelle de 1 × 05 broches (SV3) sert à connecter codeur quadratique (incrémental ou décremental) HTO ENC1J-D28-L00128 de la compagnie BOURNS®. La photo de ce codeur optique est ci-dessous dans cette figure 5.8.



Figure 5.8 : Photo du codeur quadratique HTO ENC1J-D28-L00128

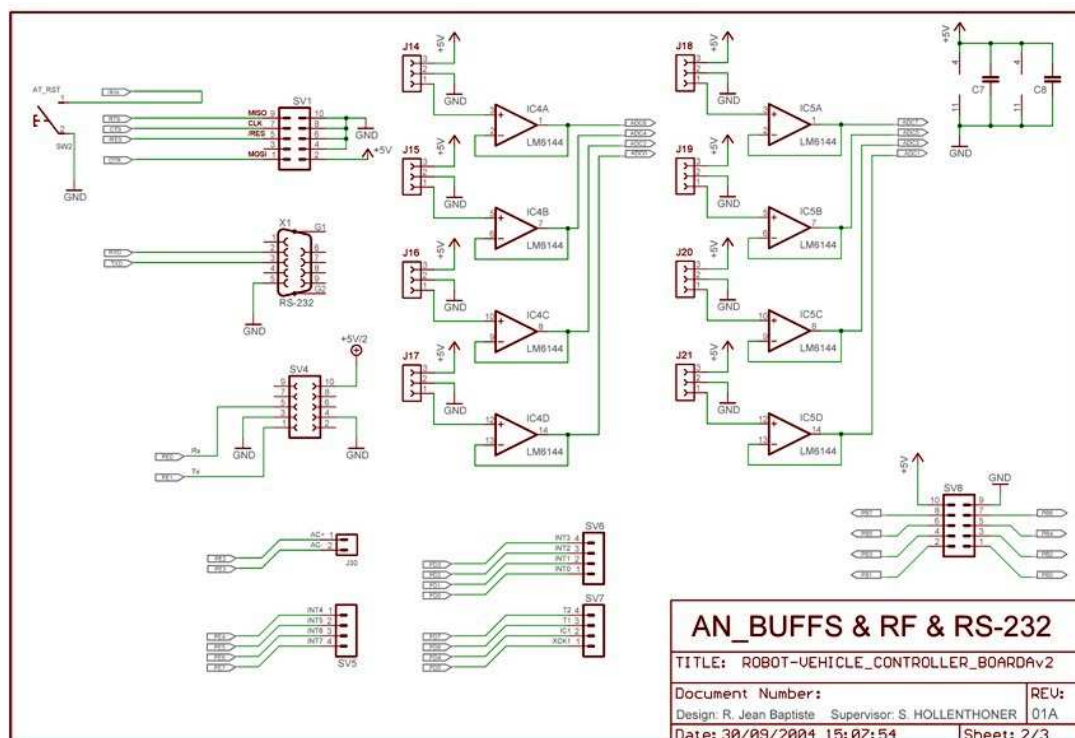


Figure 5.9 : Schéma de la carte électronique de contrôle et de commande à ATmega128 (feuille 2/3)

Dans notre conception illustrée dans le schéma (feuille 2/3) sur la figure 5.9 précédente, cette carte contient aussi des composants suivants :

- Un (01) connecteur mâle à double rangée 2×5 SV1 pour connecter le programmeur "ISP - Programmer STK 300" de l'ATmega128-16
- Un (01) port série DB9 RS-232 utilisé pour les échanges de données en série avec fils entre le robot-véhicule et l'ordinateur de contrôle du prototype de Robot-Véhicule
- Un (01) connecteur femelle à double rangée 2×5 SV4 utilisé pour connecter le transmetteur radiofréquence "WIZ-SML-IA"
- Un (01) connecteur mâle à double rangée 2×5 SV8 utilisé pour connecter la carte de commande et de contrôle des moteurs avec le microcontrôleur ATmega128-16

La figure 5.10 ci-dessous montre le circuit imprimé de la carte électronique de contrôle et de commande à ATmega128-16 conçue et réalisée sur lequel sont implantés les composants ci-mentionnés.

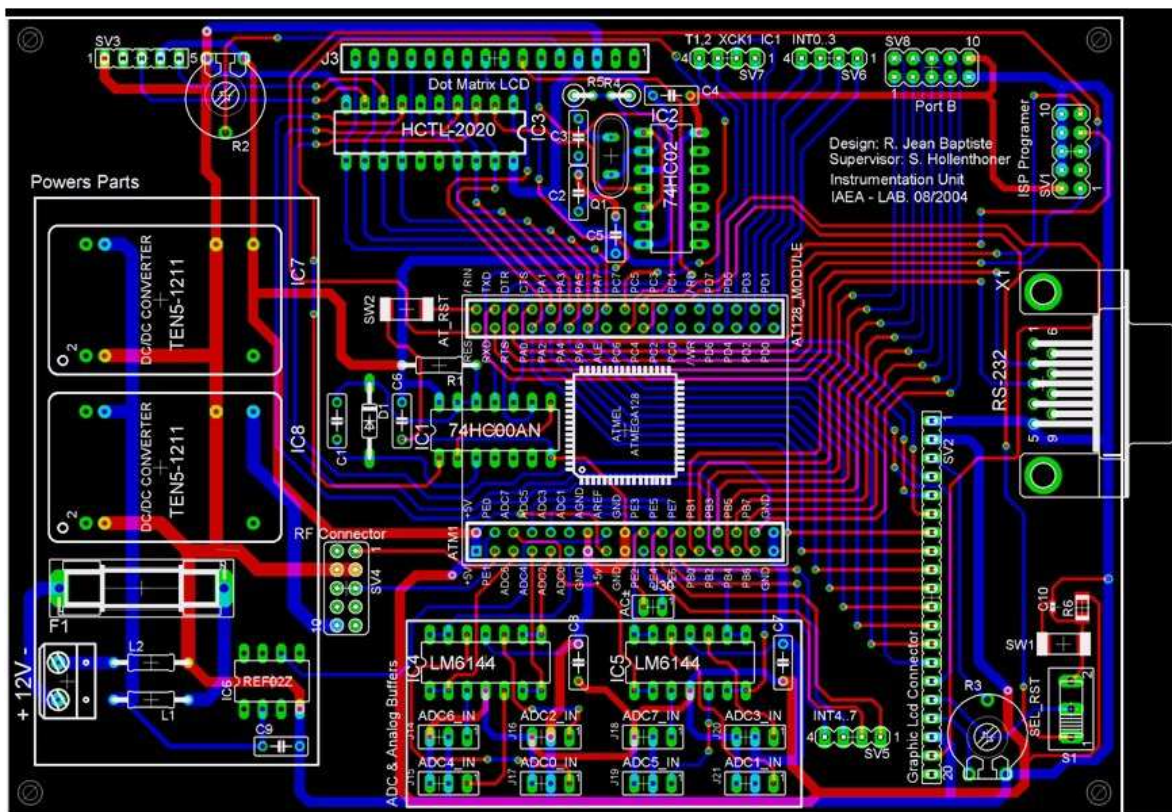


Figure 5.10 : Le circuit imprimé de la carte électronique de contrôle et de commande à ATmega128-16

Les composants suivants sont aussi montés dans ce circuit imprimé de la 2^{ème} carte :

- Un (01) connecteur mâle à simple rangée 1×4 SV5 qui se sert pour connecter les ports d'interruption INT4, INT5, INT6, INT7 de l'ATmega128-16 avec d'autres circuits extérieurs.
- Un (01) connecteur mâle à simple rangée 1×4 SV6 qui se sert pour connecter les ports d'interruption INT0, INT1, INT2, INT3 de l'ATmega128-16 avec des circuits extérieurs.

- Un (01) connecteur mâle à simple rangée 1×4 SV7 qui se sert pour connecter les ports T1, T2, XCK1 et IC1 de l'ATmega128-16 avec d'autres circuits.
- Un (01) connecteur mâle à simple rangée 1×2 J30 / AC \pm pour connecter des circuits extérieurs avec les ports comparateurs analogiques AIN0 (XCK0) et AIN1 (OC3A) de l'ATmega128-16
- Huit (08) connecteurs mâles aux simples rangées 1×3 J14, ..., J21 connectés respectivement aux entrées positives des huit (08) amplificateurs opérationnels de deux (02) circuits intégrés LM6144 (IC4 et IC5) tous montés en suiveur de tension. Les pins 1 de sorties de ces huit (08) Amplificateurs Opérationnels IC4A, IC5A,...IC4D, IC5D sont directement connectés aux huit (08) pins d'entrées du Convertisseur Analogique Numérique [(PF0 : ADC0),..., (PF7 : ADC7)] de l'ATmega128-16.

5.1.2.2. L'électronique de commande et de contrôle des moteurs

La figure 5.11 ci-dessous représente le synoptique de la carte de commande et de contrôle des moteurs.

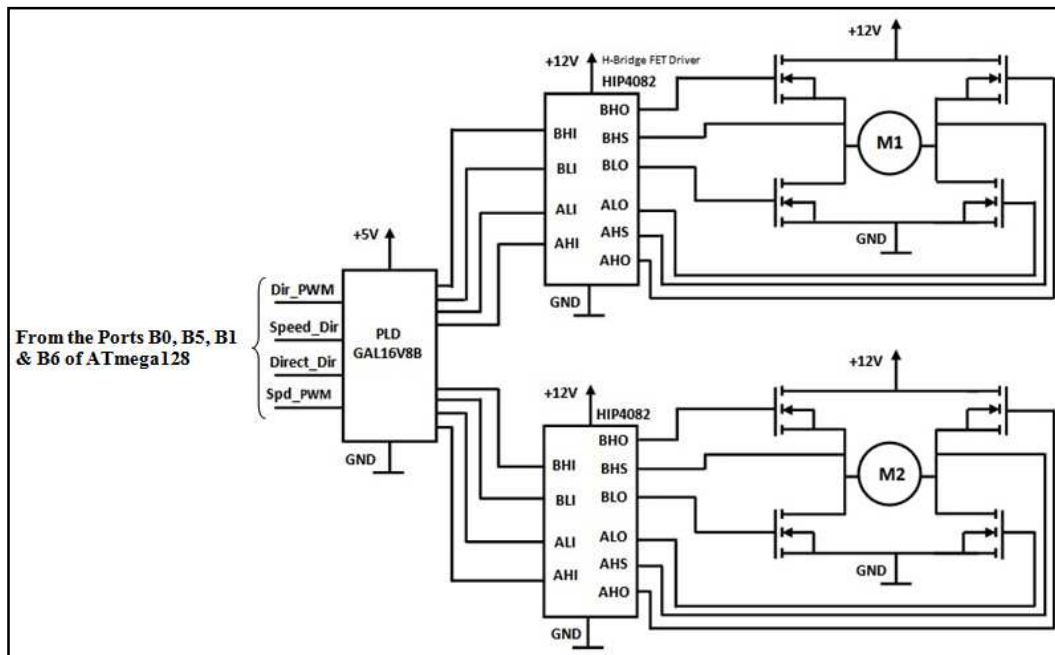


Figure 5.11 : Le synoptique de la carte de commande et de contrôle des 02 moteurs

Cette carte est alimentée directement par une tension continue +12V délivrée par la batterie de +12VDC – 7Ah. Elle est faite pour contrôler deux (02) moteurs à courant continu de +12V, 3Ncm et de 2900 tours par minute de propulsion. En disposant cette tension de +12V de batterie pour faire fonctionner ces deux (02) moteurs à courant continu, l'approche pratique pour varier les vitesses et inverser les sens de rotation de ces derniers est de faire varier la valeur moyenne de cette tension continue de +12V d'alimentation de ces deux (02) moteurs.

Ainsi, ces moteurs sont commandés à partir des Ports B0, B5 (OC1A), B1 et B6 (OC1B) du microcontrôleur ATmega128 en utilisant la commande PWM (*Pulse Width Modulation*)

en anglais) ou MLI (*Modulation par Largeur d'Impulsion en français*). Le circuit intégré à logique programmé GAL16V8B sert à fournir les états logiques instantanés nécessaires aux entrées des circuits intégrés HIP4082 pilotes des circuits d'amplification à transistors MOSFET à canal N IRF3205 montés en "Full Bridge". Ce circuit aux HIP4082 reçoivent les signaux PWM de niveaux logique CMOS (entre 0V et +5V) fournis par le microcontrôleur ATmega128-16 et les amplifient/retransmettent aux moteurs. Cette carte est aussi conçue pour protéger à la fois l'ATmega128-16 et ces deux moteurs.

Le schéma électronique détaillé de la carte de commande et de contrôle de ces 02 moteurs est illustré dans la figure 5.12 suivante.

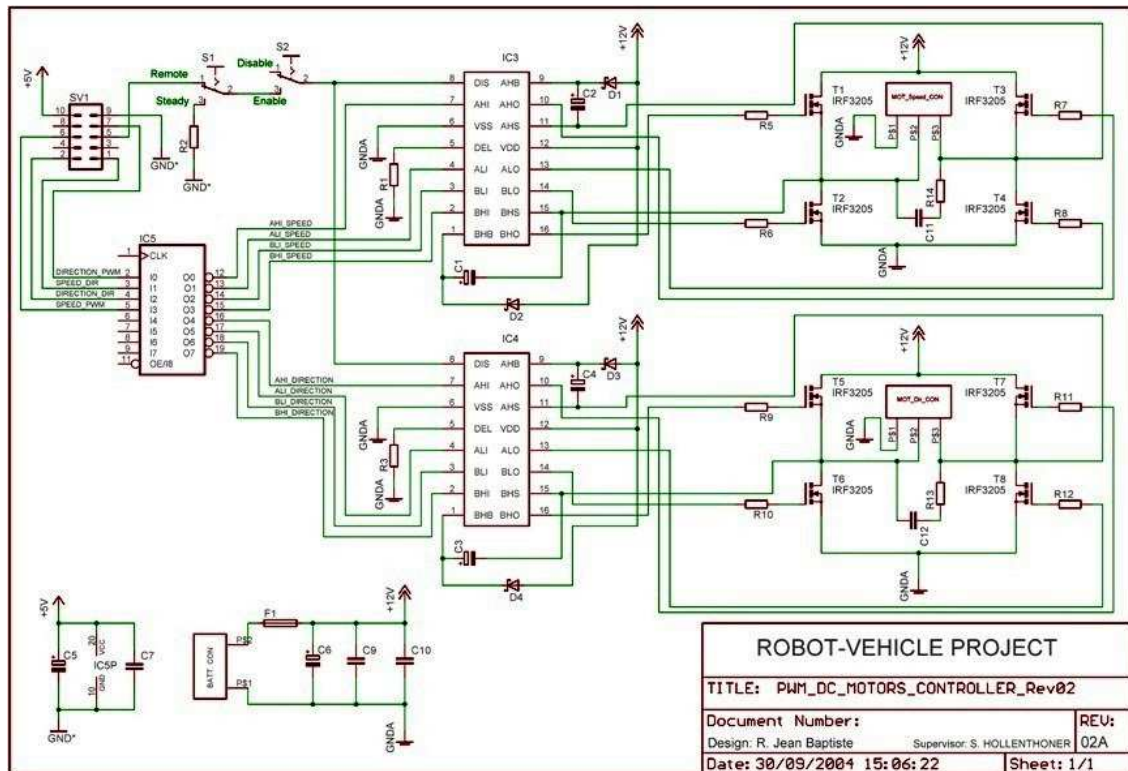


Figure 5.12 : Le schéma électronique de la carte de commande et de contrôle des moteurs

Le circuit imprimé de la carte de commande et de contrôle des 02 moteurs réalisé est illustré dans cette figure 5.13 ci-dessous.

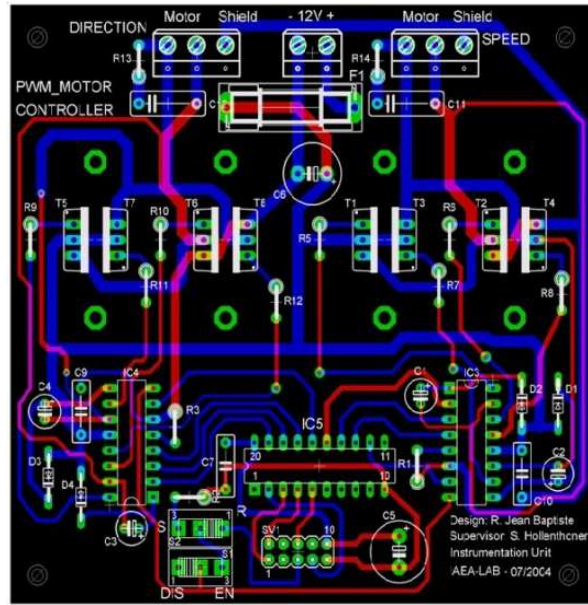


Figure 5.13 : Le circuit imprimé de la carte de commande et de contrôle des 02 moteurs

5.1.2.3. L'électronique de détection de la radioactivité

Un des grands objectifs de ce travail est de concevoir et réaliser un circuit électronique capable de mesurer à distance le taux radioactivité d'une zone contaminée.

- Deux (02) détecteurs Geiger-Muller modèles **LND7313** en forme de galette à fenêtre mince de Mica ont été utilisés pour détecter les rayonnements Alpha, Beta et Gamma. LND7313 est conçu spécialement pour la mesure de la contamination radioactive [4]. La figure 5.14 suivante illustre les photos de ces détecteurs LND7313 ainsi que son circuit imprimé associé.

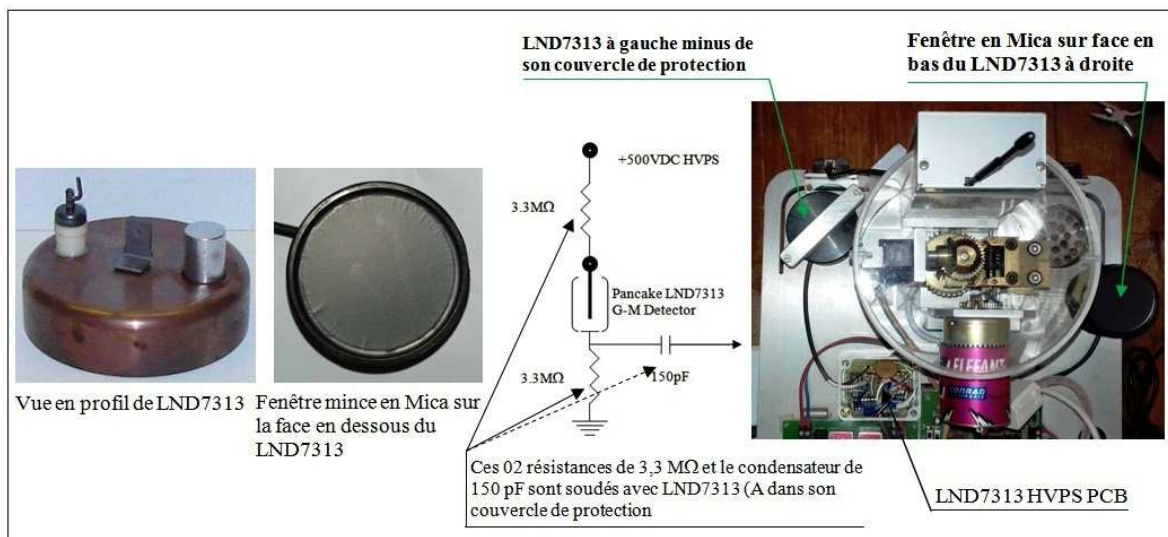


Figure 5.14 : Photos des détecteurs G-M LND7313 et sa carte électronique associée

Les spécifications de ces deux (02) détecteurs LND7313 montés à bord du robot – véhicule sont données dans le tableau 5.1 ci-dessous.

Tableau 5.1 : Spécifications du détecteur LND7313

Spécifications générales	
Gaz	Néon + gaz Halogène
Matériaux pour la fabrication de la cathode	Acier inoxydable 446
Longueur maximale (mm)	31,7
Profondeur effective (mm)	12,7
Diamètre maximal (mm)	53,1
Diamètre effectif (mm)	44,5
Connecteur	Broche
Température de fonctionnement [° C]	-40 à +75
Spécifications de sa fenêtre de détection	
Diamètre effectif [mm]	44,5
Matériel de fabrication de cette fenêtre	Mica
Spécifications électriques	
Valeur de la résistance sur l'anode [MΩ]	4,7
Tension maximale de démarrage de la polarisation [V]	425
Tension de fonctionnement recommandé [V]	500
Plage de la tension de polarisation [V]	475 - 675
Temps mort minimal [μs]	40
Sensitivité sur la détection des rayonnements gamma [cps/mR/hr] pour le ⁶⁰ Co	60
Poids [g]	125

- Un convertisseur de tension continue en tension continue en miniature PICO 5SMV500 est utilisé pour convertir la tension continue d'alimentation de la carte de +5V en haute tension de +500V pour polarisation de ces deux (02) détecteurs Geiger Müller. La mise en état logique bas (*mise à zéro*) du Port D4 de l'ATmega128-16 active un relais en circuit intégré 3570 qui par la suite alimente l'entrée du convertisseur 5SMV500. La haute tension de polarisation se désactive lorsque le Port D4 est à l'état logique haut (*mise à un*). Quatre (04) diodes Schottky BAT85 et le circuit intégré CD40106N sont utilisés pour la mise en forme des signaux venant de ces deux (02) détecteurs. Ces signaux normalisés sont additionnés par une porte NAND du circuit intégré CD4011N. La sortie de cette porte NAND est alors

connectée au Port D7 (Compteur T2) de l'ATmega128-16 pour que les événements détectés puissent être comptés. Le schéma synoptique, la courbe de Sensibilité du détecteur LND7313 aux rayonnements gamma [cps/mR/hr] pour le ^{60}Co , le schéma électronique et le circuit imprimé de la carte de détection de la radioactivité conçue et réalisée sont représentés dans les trois (03) figures 5.15, 5.16 et 5.17 suivantes :

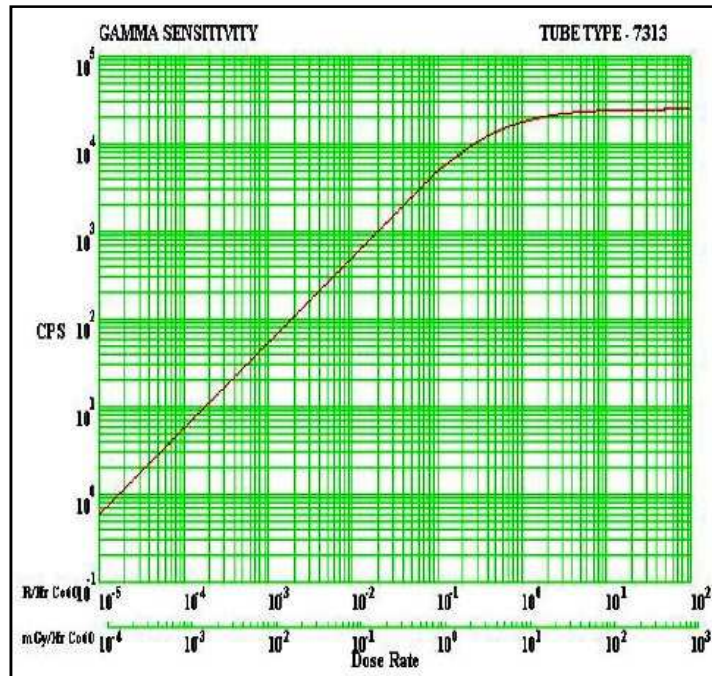


Figure 5.15 : la courbe de sensibilité du détecteur LND7313 aux rayonnements gamma [cps/mR/hr] pour le ^{60}Co

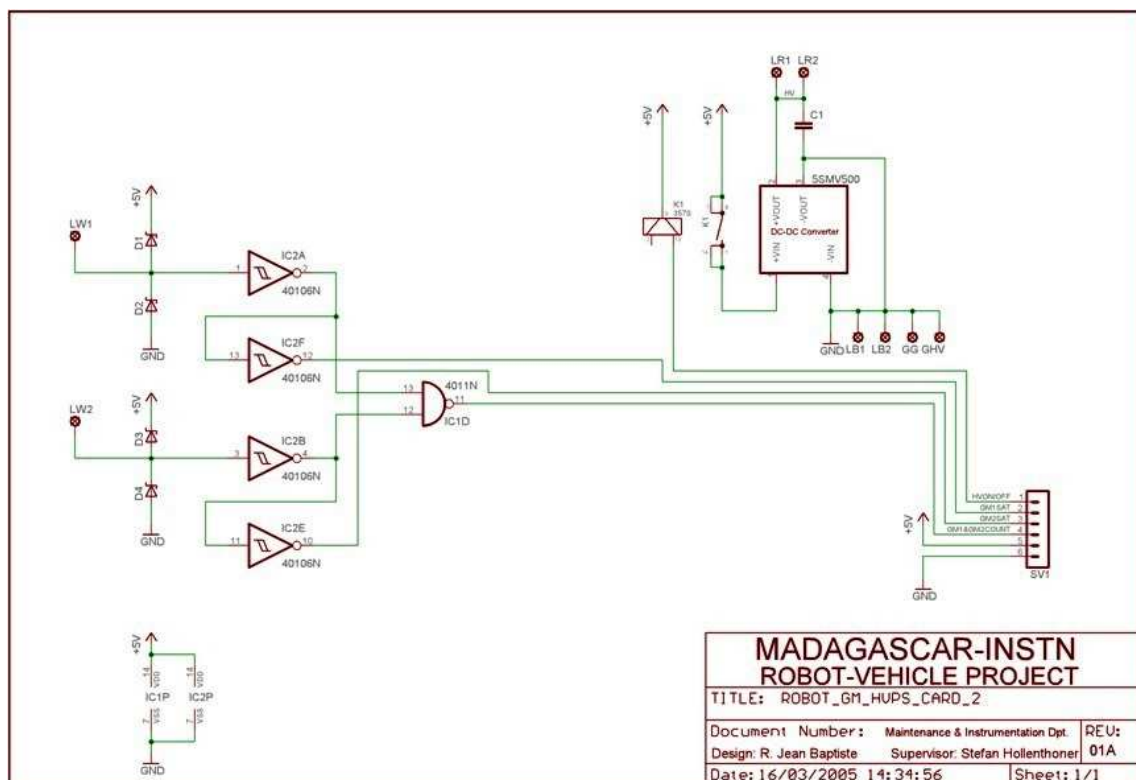


Figure 5.16 : Le schéma électronique du circuit de détection de la radioactivité

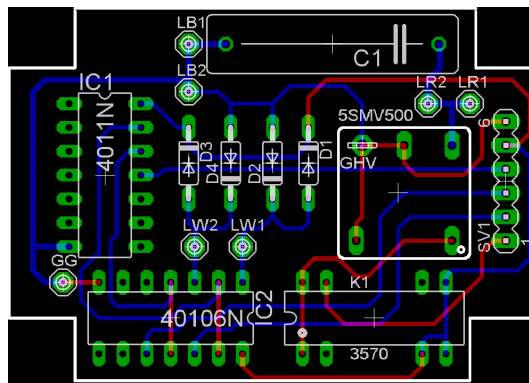


Figure 5.17 : Le circuit imprimé de la carte de détection de la radioactivité

5.2. L'Aspect informatique du prototype

5.2.1. Le système de développement

Spécialement développés pour les microcontrôleurs "AVR" d'Atmel™, un système intégré de développement BASCOM-AVR, version 1.11.7.4 de la compagnie MCS Electronics® muni d'un "ISP-Programmer STK 300" est utilisé pour développer le programme "moniteur" de ce prototype de Robot-Véhicule. Sa fenêtre sous Windows XP est représentée dans la figure 5.18 ci-dessous [2].

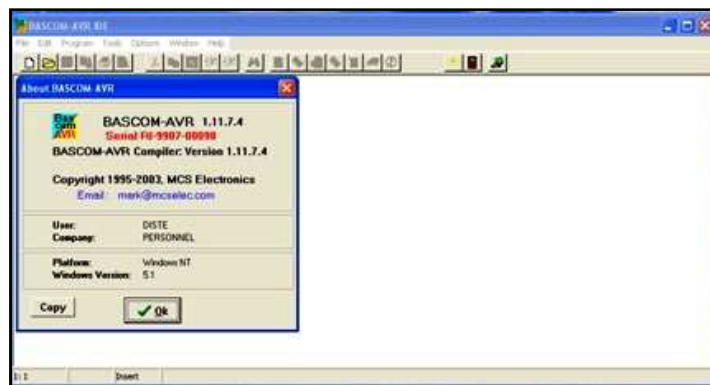


Figure 5.18 : Présentation de la fenêtre du logiciel BASCOM-AVR, version 1.11.7.4

Développer une application sous BASCOM-AVR consiste :

- à écrire d'abord le programme en langage "BASIC" à l'aide d'un éditeur de texte intégré minus de correcteur automatique d'erreur de syntaxe
- on compile ensuite ce programme que l'on peut tester à l'aide du simulateur intégré. L'utilisation de ce dernier permet d'exécuter le programme en mode "pas-à-pas" jusqu'à une ligne particulière où il y a une ou des erreurs, mais également de surveiller l'état des registres et des ports de l'ATmega128-16.
- on transfère finalement le programme compilé par téléchargement dans la mémoire Flash de notre microcontrôleur ATmega128-16 à l'aide du programmeur des microcontrôleurs AVR dans le système "ISP - Programmer STK 300 (en anglais *In System Programming* –

Programmer Starter Kit 300)", une fois qu'il est au point. Le schéma de ce programmeur est illustré dans la figure 5.19 suivante.

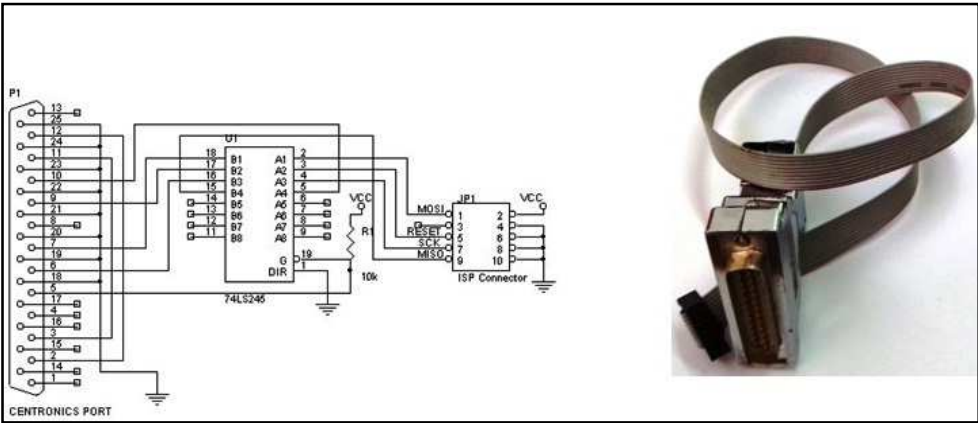


Figure 5.19 : Le programmeur des microcontrôleurs AVR "ISP - Programmer STK 300"

5.2.2. Le module de manette de contrôle

Une manette connectée au port parallèle de l'Ordinateur de contrôle est conçue pour contrôler totalement le mouvement (vitesse et direction) du prototype de Robot-Véhicule. Le principe consiste à lire l'état du registre interne de contrôle de ce port parallèle LPT1 à l'adresse \$378+1, à chaque fois que l'on appuie sur un des poussoirs constituant la manette. Cet état, codé sous un caractère en ASCII, est ensuite envoyé au robot afin d'exécuter certaines lignes d'instructions d'un programme correspondant à une action particulière du robot. La figure 5 suivante représente le synoptique de l'interface manette de contrôle. Ci-dessous dans la figure 5.20 son principe.

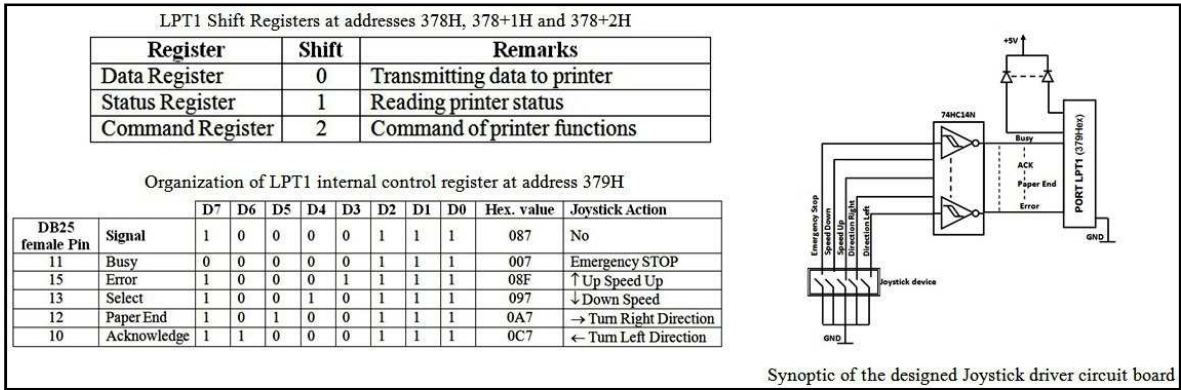


Figure 5.20 : Le schéma de principe de la manette de contrôle du robot-Véhicule

Le circuit imprimé et le schéma électronique de la carte d'interface manette de contrôle sont dans les figures 5.21 et 5.22 suivantes.

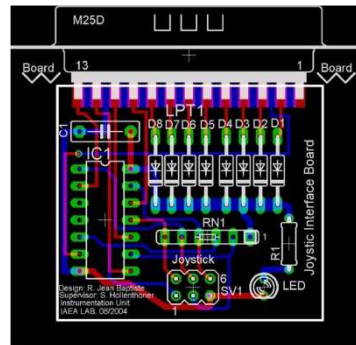


Figure 5.21 : Le circuit imprimé de la carte d'interface manette de contrôle

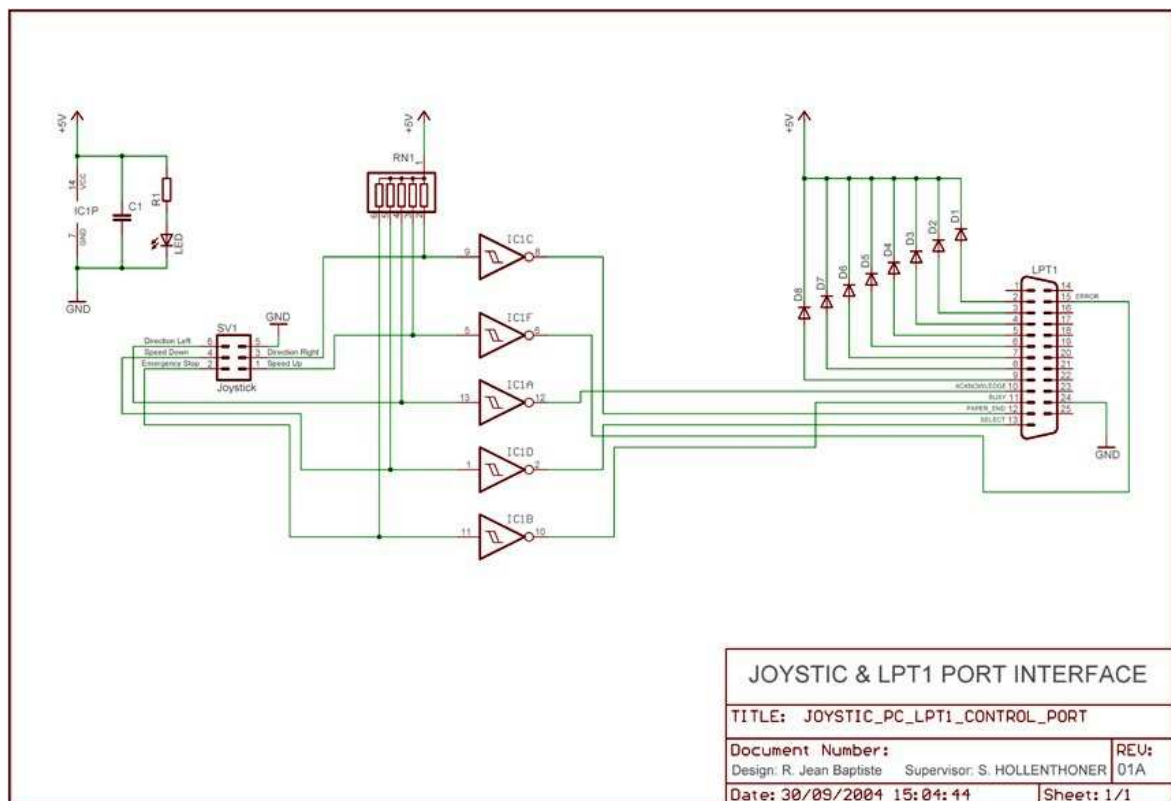


Figure 5.22 : Le schéma du circuit d'interface manette de contrôle de Robot-Véhicule

5.2.3. Le programme "moniteur" du prototype

Le contrôle du robot s'effectue par l'échange et traitement des chaînes des caractères en code ASCII arrivant simultanément sur la plateforme Robot-Véhicule et l'Ordinateur de contrôle. Le tableau 5.2 ci-dessous résume les principaux caractères de commandes entre l'Ordinateur et l'ATmega128 permettant de contrôler le prototype.

Tableau 5.2 : Principaux caractères en ASCII de commandes entre l'Ordinateur et le robot

Command	Computer Control Station side		AT128 Controller Robot-Vehicle side
	Character	Direction	Character
System Ready?	R	⇒	
Reconnaissance		⇐	O
Speed change?	S+ or S-	⇒	xyz
Acknowledgement	Display!	⇐	xyz
Direction change?	D+ or D-	⇒	abc
Acknowledgement	Display!	⇐	abc
Emergency Stop	H	⇒	
Acknowledgement		⇐	E

Le programme "moniteur" conçu est reparti en sous programmes. Toutes les commandes sur le fonctionnement du Robot-Véhicule ou une de ses parties sont basées sur une interruption transmission série RX complète "Urx" de l'ATmega128-16 et l'attente d'un caractère en ASCII particulier. La réception de l'un de ces caractères particuliers provoque un saut de programme vers un sous programme spécifié correspondant au sous programme de gestion d'interruption.

Les principaux sous programmes sont :

- comptage des événements radioactifs lors de la détection
- commande pour le déplacement du robot
- lecture des détecteurs d'évitement d'obstacles
- localisation du robot

Ci-dessous dans la figure 5.23 l'extrait d'organigramme de la routine de traitement des principaux caractères de commandes reçus par interruption "Urx" suivi de sa source en BASCOM-AVR.

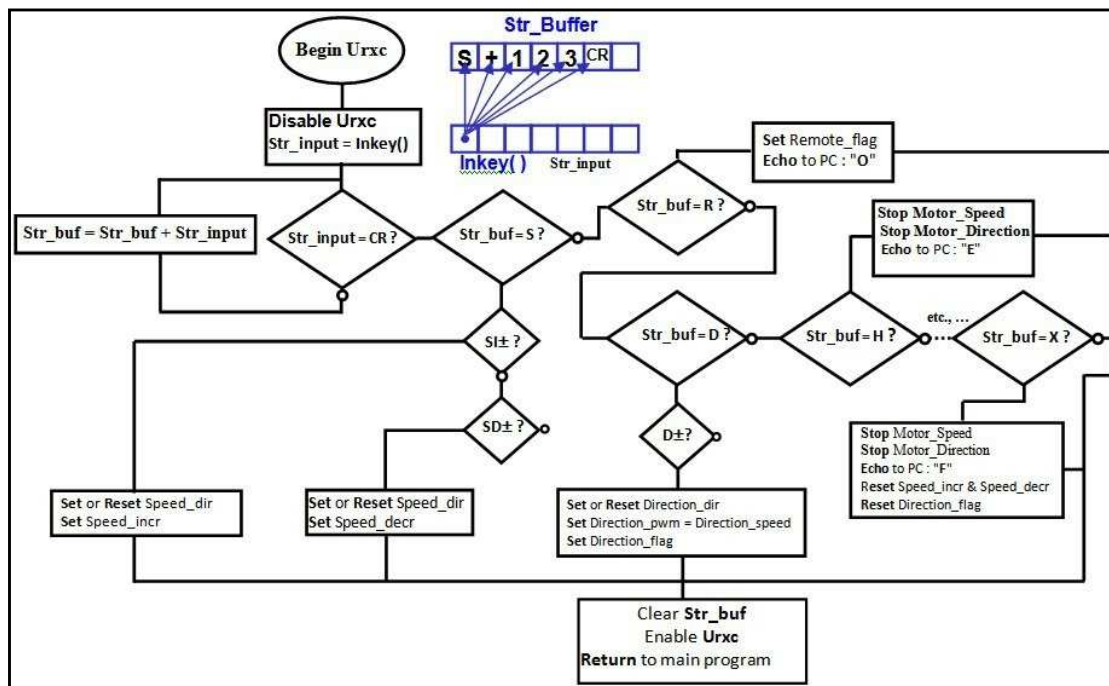


Figure 5.23 : Organigramme de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx"

<pre>'\$sim '\$dbg Speed_dir Alias Portb.0 Speed_pwm Alias Pwmla Direction_dir Alias Portb.1 Direction_pwm Alias Pwmlb Stop_motor Alias 255 'Direction_speed Alias 180 Direction Alias 7 Const Horizontal = 0 Const Vertical = 0 Dim D As Single Dim T7 As Single Dim A As Single Dim B As Single Dim Teta As Single , Alpha As Single Dim Vcos As Single , Vsin As Single Dim Resi As Single , Resj As Single , Dim Resk As Single , Horiz As Single Dim Vertic As Single , Horp As Single Dim Verv As Single , Temp As Byte Dim Buf As Byte, I As Byte , Cnt As Byte Dim Tim As Word Dim Ang As Integer , M As Integer</pre> <p>(- page 1-)</p>	<p>(Suite de programme "Monitor")</p> <pre>Dim Speed As Integer , Speed_cnt As Integer Dim E As Integer , Dim Dir_speed As Integer Dim Remote_flag As Bit , Speed_incr As Bit Dim Speed_decr As Bit , Resv As String * 5 Dim Direction_flag As Bit , Chan As Byte Dim W As Word , W7 As Word Dim Res As Long , H_byte As Byte , L_byte As Byte Dim Str_buf As String * 20 , Str_input As String * 20 Dim Sensor_buffer As String * 5 , Str_turn As String * 5 Dim Str_speed As String * 5 , Gm_buffer As String * 10 Dim Turn_buffer As String * 5 , Rot_buffer As String * 10 Dim V_buffer As String * 10 , H_buffer As String * 10 Dim Str_sens As String * 10 , Str_rot As String * 10 Dim Str_gm As String * 10 , Str_d As String * 3 Dim Resf As String * 5 , Resh As String * 5 Dim Str_h As String * 10 , Str_v As String * 10 Declare Sub Initialize_hardware() Declare Sub Read_rotary_encoder() Declare Sub Turn() Declare Sub Read_ir_sensor() Declare Sub Read_gm_counter() Declare Sub Read_vehic_position() Call Initialize_hardware()</pre> <p>(- page 2 -)</p>
---	--

Figure 5.24 : Le programme source de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx" en BASCOM-AVR

<p>(Suite de programme "Monitor")</p> <pre>On Urx Read_chr Enable Interrupts Enable Urx Again: Print " Waiting To Receive R before start" Do Loop Until Remote_flag=1 Call Turn() 'Read actual direction Call Read_ir_sensor() Call Read_rotary_encoder() Call Read_vehic_position() Call Read_gm_counter() While Remote_flag=1 While Speed_decr=1 If Speed<255 Then Speed=Speed+5 Speed_pwm=Speed Speed_cnt=Speed_cnt-2 Str_speed="S"+Str(speed_cnt) Print Str_speed Waitms 100 Str_speed="" Else ResetSpeed_decr EndIf EndIf Wend</pre> <p>(- page 3-)</p>	<pre>While Speed_incr=1 If Speed>5 Then Speed=Speed-5 Speed_pwm=Speed Speed_cnt=Speed_cnt+2 Str_speed="S"+Str(speed_cnt) Print Str_speed Waitms 100 Str_speed="" Else ResetSpeed_incr EndIf Wend If Direction_flag=1 Then If Dir_speed>150 Then Dir_speed=Dir_speed-5 Direction_pwm=Dir_speed EndIf Call Turn() EndIf If Speed<255 Then Call Read_ir_sensor() Waitms 25 If Speed<210 Then Call Read_rotary_encoder() Waitms 10 Call Read_vehic_position() EndIf Wend Goto Again End</pre> <p>(- page 4 -)</p>
---	---

Figure 5.25 : Le programme source (suite) de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx" en BASCOM-AVR

(Suite de programme "Monitor")	
<pre> Read_chr: Dbg Disable Urxc Str_input = Inkey() If Asc(str_input) <> &H0D Then Str_buf = Str_buf + Str_input 'Concatate string Else If Asc(str_buf) = 83 Then 'Check for "S" Str_input = Mid(str_buf, 2, 2) 'Extract a number = sign "I+", "L-", "D+", "D-" from a string If Str_input = "I+" Then 'Move forward and increment continuously speed Reset Speed_dir Set Speed_incr End If If Str_input = "L-" Then Set Speed_dir End If 'Move backward and increment continuously Speed Set Speed_incr End If If Str_input = "D+" Then Reset Speed_dir End If 'Move forward and decrement continuously Speed Set Speed_decr End If If Str_input = "D-" Then Set Speed_dir End If 'Move backward and decrement continuously Speed Set Speed_decr End If End If </pre>	<pre> If Asc(str_buf) = 68 Then 'Check for "D" Str_input = Mid(str_buf, 2, 1) If Str_input = "+" Then Reset Direction_dir 'Turn left End If If Str_input = "-" Then Set Direction_dir 'Turn right End If Direction_pwm = Direction_speed Set Direction_flag End If If Asc(str_buf) = 82 Then 'Check for "R" Set Remote_flag Print "O" Waitms 25 End If If Asc(str_buf) = 72 Then 'Check for "H" Speed_pwm = Stop_motor Stop motor speed Direction_pwm = Stop_motor Stop motor direction Print "E" Waitms 25 Set Portb.3 'Disable OE for HCTL2020 End If </pre>
(- page 5-)	(- page 6 -)

Figure 5.26 : Le programme source (suite) de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx" en BASCOM-AVR

(Suite de programme "Monitor")	
<pre> If Asc(str_buf) = 88 Then 'Check for "X" Direction_pwm = Stop_motor Print "F" Waitms 10 Reset Speed_incr Reset Speed_decr Reset Direction_flag Dir_speed = 210 Call Turn() End If If Asc(str_buf) = 84 Then 'Check for "T" Str_input = Mid(str_buf, 2, 3) Tim = Val(str_input) End If If Asc(str_buf) = 80 Then 'Check for "P" Call Read_rotary_encoder() End If If Asc(str_buf) = 71 Then 'check for "G" for GM-counter Call Read_gm_counter() End If If Asc(str_buf) = 59 Then 'Check for "Y" for switching off HV Set Portd.4 End If If Asc(str_buf) = 90 Then 'Check for "Z" for switching on HV Reset Portd.4 End If Str_buf = "" End If Enable Urxc Return </pre>	
(- page 7 -)	

Figure 5.27 : Le programme source (suite) de la routine de traitement des caractères de commandes reçus par interruption "Urx" en BASCOM-AVR

Comme la base de mécanisme de contrôle de mon prototype de Robot-Véhicule éducationnel, ce programme "**Monitor**" que j'ai conçu peut se traduire autrement comme suivant :

- À l'arrivée d'une chaîne de caractère codée en ASCII, on lit de cette chaîne de caractère reçue.
- Si le premier (1^{er}) caractère, de cette chaîne reçue, est différent de la touche "**Enter** ou **CR Carriage Return en anglais**", arrêter. Sinon, exécuter ce qui suit :
- Stocker les caractères dans le variable **String_buf**.
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**S**", Si le deuxième (2^{ième}) est le caractère "**I**", et si le troisième est le caractère "+", alors **faire avancer le véhicule en augmentant continuellement sa vitesse**.
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**S**", Si le deuxième (2^{ième}) est le caractère "**I**", et si le troisième (3^{ième}) est le caractère "-", alors **faire reculer le véhicule en augmentant continuellement sa vitesse**.
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**S**", Si le deuxième (2^{ième}) est le caractère "**D**", et si le troisième (3^{ième}) est le caractère "+", alors **faire avancer le véhicule en diminuant continuellement sa vitesse**.
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**S**", Si le deuxième (2^{ième}) est le caractère "**D**", et si le troisième (3^{ième}) est le caractère "-", alors **faire reculer le véhicule en diminuant continuellement sa vitesse**.
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**R**", alors mettre à 1 le bit **Remote_flag** et envoyer le caractère "**O**".
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**H**", c'est l'arrêt d'urgence, alors arrêter le véhicule et envoyer le caractère "**E**".
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**G**", alors exécuter le sous programme "**read_gm_counter**".
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**X**", alors initialiser les sous programmes pour le déplacement et la direction. Puis envoyer le caractère "**F**".
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**Y**" alors désactiver la haute tension de polarisation de 02 détecteurs G-M LND7313.
- Si le premier (1^{er}) caractère est "**Z**" alors activer cette haute tension.
- Ainsi de suite ... on peut aussi étendre et designer d'autres caractères codés en ASCII choisis pour contrôler d'autres applications autour de ce prototype conçu de Robot-Véhicule (comme **P** par exemple pour le contrôle de la position du Robot-Véhicule).

5.2.4. Les transmetteurs Radio Fréquence

5.2.4.1. La transmission à distance des données

Deux (02) modules d'un transmetteur radiofréquence "**WIZ-SML-IA**" en "**mode half-duplex**" sont utilisés pour faire des échanges informations "*point à point*" entre le Robot-Véhicule et l'ordinateur de contrôle placé dans un centre de commande et de

contrôle. Ce module de $4 \times 9\text{cm}^2$ de dimension intègre un transmetteur "XTR-434" de vitesse maximale de transmission de 100kbps configurable à partir d'un DIP Switch à 6 positions et un microcontrôleur AVR de l'Atmel® AT90S2313 qui gère le protocole de synchronisation radiofréquence. La connexion RS232 prend place sans bit de contrôle (1 start bit, 8 data bit, 1 stop bit). Le bit d'arrêt n'est pas nécessaire dans le format du message à transmettre. Le module considère toute chaîne des caractères, de 96Octets au maximum, arrivant sur son pin TX data et transmet celui-ci vers un l'autre module à condition que l'espace entre eux ne soit supérieure à 1,5Octets définit par la vitesse de transmission. Le premier (1^{er}) module monté dans le robot est connecté directement aux ports PE0 (RXD0) et PE1 (TXD0) de l'ATmega128-16. Le deuxième (2^{ème}) module est connecté au Port série RS232 de l'Ordinateur de contrôle par l'intermédiaire d'un circuit intégré MAX232, convertisseur de tension de -12V à +12V. La portée de ce transmetteur, en plein air est de 300 m au maximum.

La photo à la figure 5.28 ci-dessous représente ce module transmetteur radiofréquence "WIZ-SML-IA".



Figure 5.28 : La photo du transmetteur radiofréquence de 434 MHz "WIZ-SML-IA"

5.2.4.2. La chaîne de télésurveillance

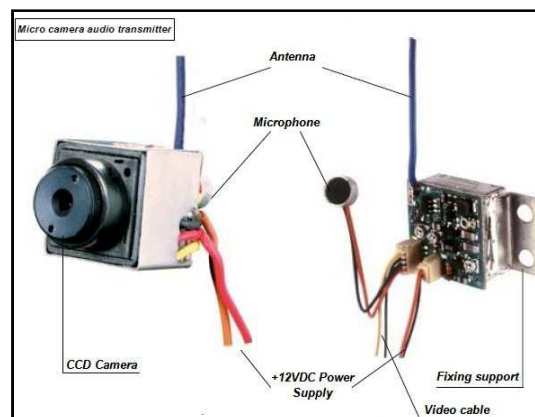


Figure 5.29 : La photo du module transmetteur vidéo "Gigalink" de 2,4 GHz

Une (01) caméra CCD en noir et blanc couplée avec un transmetteur vidéo "Gigalink" de 2,4 GHz est montée à bord (au devant) du Robot-Véhicule. La séquence d'image de l'environnement en face du robot est capturée par un récepteur vidéo "Gigalink" de 2,4 GHz (Compatible PAL, SECAM et NTSC) connecté avec un module d'acquisition

vidéo à interface USB "USB-190" de la compagnie ADS. La portée de ce transmetteur, en plein air, est aussi de 300m au maximum.

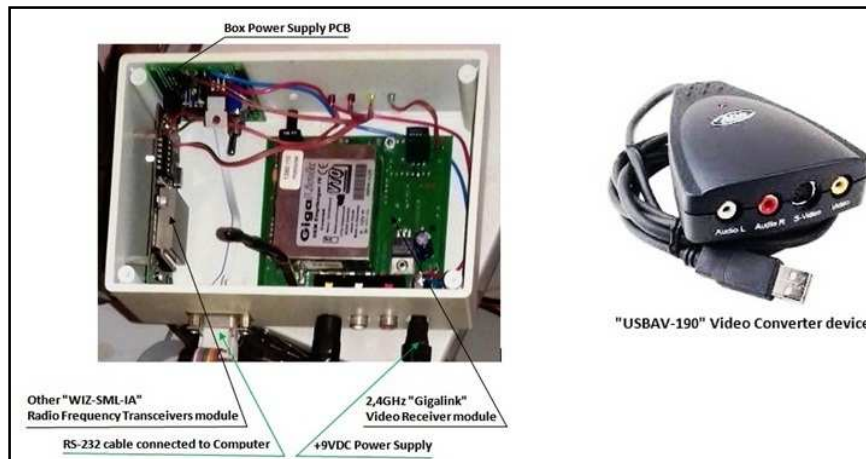


Figure 5.30 : La photo de la boîte contenant le module récepteur vidéo "Gigalink" de 2,4 GHz, l'autre transmetteur radiofréquence "WIZ-SML-IA" connecté avec un module d'acquisition vidéo à interface USB "USB-190"

5.2.5. Le sous programme comptage à distance des événements radioactifs

Les deux (02) détecteurs G-M LND7313 sont polarisés lorsque le Robot-Véhicule reçoit le caractère Z. La haute tension de polarisation de ces détecteurs de radiation se désactive lors de sa réception d'un caractère Y. La lecture et comptage d'événements radioactifs se fait lors de sa réception d'un caractère G. Le Port D7 (Timer2) du microcontrôleur ATmega128-16 compte automatiquement tout le front d'impulsion externe montant arrivant sur lui. Il fonctionne en mode asynchrone. Un Timer0 lit et remis à zéro la valeur de ce compteur2 chaque seconde. Un message d'alerte sera envoyé à l'ordinateur de contrôle dès que le taux de comptage capturé par ces détecteurs dépasse un seuil admissible.

Le sous programme source en BASCOM-AVR de comptage à distance des événements radioactifs et son correspondant organigramme sont illustrés dans la figure 5.31 suivante.

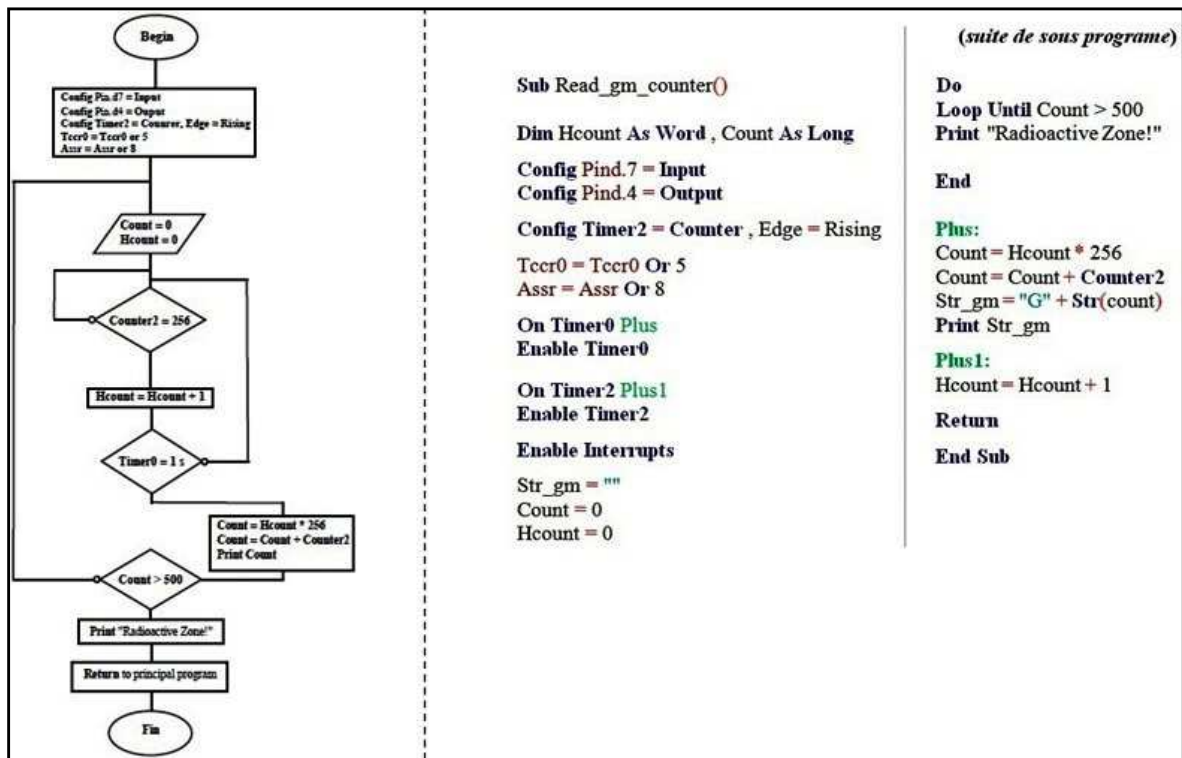


Figure 5.31 : Le circuit imprimé de la carte d'interface manette de contrôle

5.2.6. Le sous programme de détection d'obstacles

Le télémètre infrarouge permet de déterminer la distance entre 5 au 80 cm à laquelle se trouve un objet par rapport au robot. L'image de l'objet est fournie sous forme de tension variant continuellement en fonction de la distance. La tension est convertie en distance par l'ADC 10 bit de l'ATmega128-16. Le programme lit en permanence les 04 valeurs de sorties des ADC connectées aux pins de sorties des quatre (04) télémètres infrarouges **GP2D12** de la compagnie SHARP®. A l'absence d'obstacle, Le LED a de couleur verte. La présence d'un obstacle est signalée par le dépassement d'un seuil de l'une des valeurs de sortie de ces ADC et allume en rouge le LED correspondant dans le logiciel d'interface graphique utilisateur pour le robot. Les positions des 04 télémètres infrarouges **GP2D12** sur plateforme Robot-Véhicule sont lustrées dans la figure 5.32 ci-dessous.

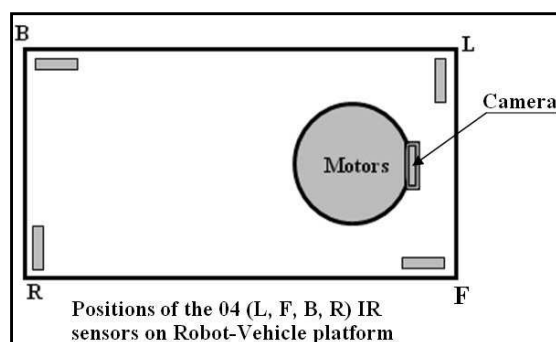


Figure 5.32 : Positions des 04 télémètres **GP2D12** sur plateforme Robot-Véhicule

Une (01) photo, un bloc diagramme de fonctionnement et la courbe caractéristique de cette (tension de sortie en fonction de la distance de l'obstacle) **GP2D12** sont représentés dans la figure 5.33 ci-dessous.

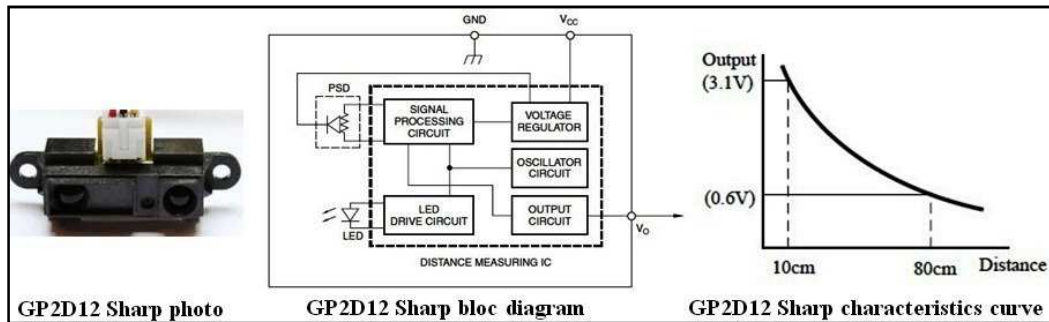


Figure 5.33 : Positions des 04 télémètres **GP2D12** sur plateforme Robot-Véhicule

Et le sous programme source en BASCOM-AVR de lecture de ces télémètres infrarouges et son correspondant organigramme sont illustrés dans la figure 5.34 suivante.

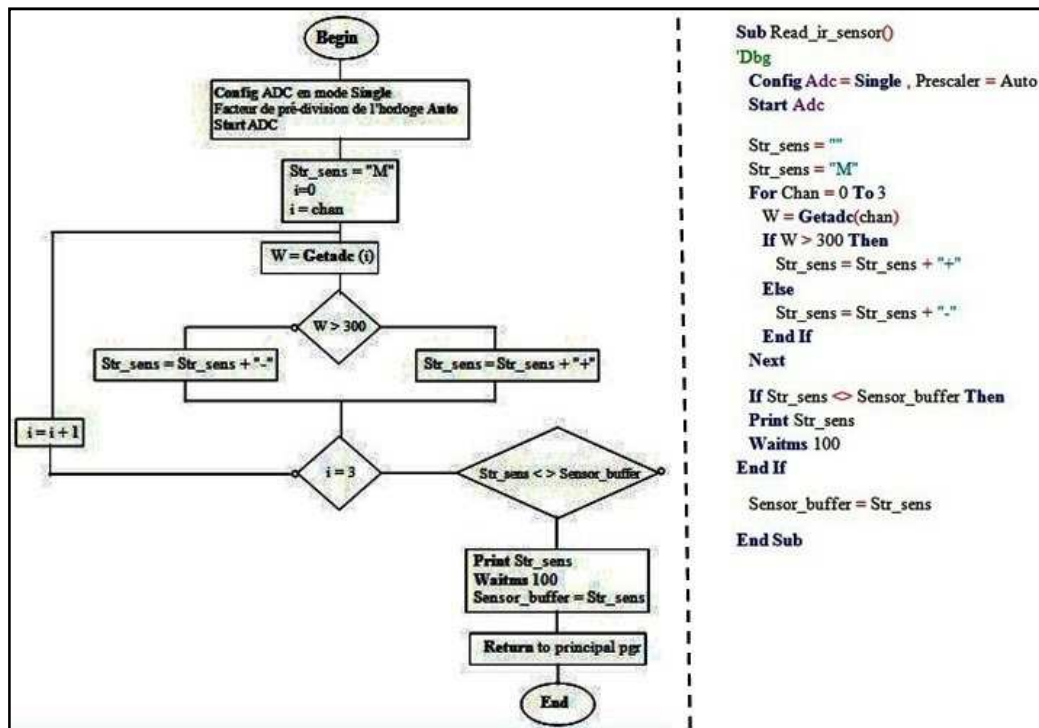


Figure 5.34 : Le sous programme source (en BASCOM-AVR) de lecture des télémètres infrarouges GP2D12 et son correspondant organigramme

5.2.7. Le sous programme d'odométrie

L'odométrie est obtenue par intégration de petits déplacements sur le plan cartésien XP_0Y (x_0y) représenté sur la figure 5.35 suivante. Dans ma conception, on approxime la trajectoire élémentaire parcourue par le prototype conçu (Robot-Véhicule de type tricycle) pendant un intervalle de temps régulier ΔT en ligne droite ΔL_j . On suppose aussi que le robot garde l'orientation qu'il avait au début de cet élément de trajectoire et que sa vitesse

reste constante sur cet élément de trajectoire. Connaissant sa position à l'instant $i-1$, on cherche sa position à l'instant i d'orientation θ_i .

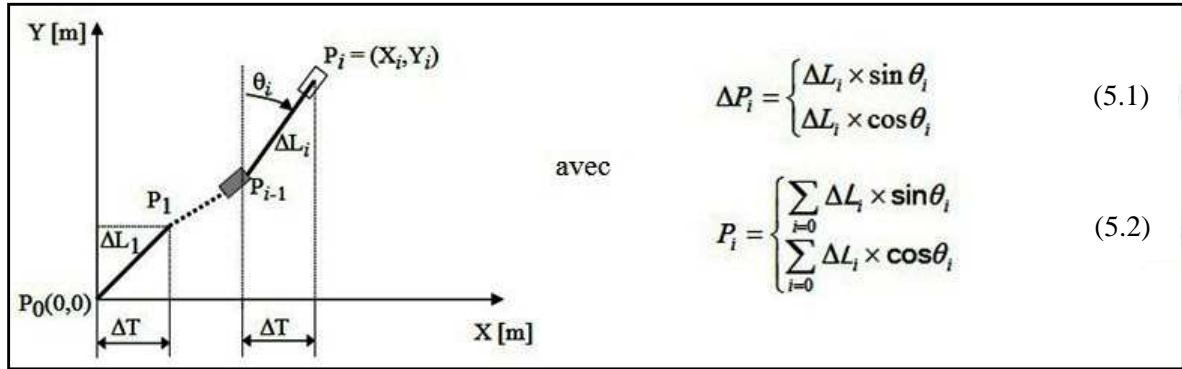


Figure 5.35 : Représentation simplifiée de la position du Robot-Véhicule conçu dans un plan XP_0Y ($x0y$)

L'organigramme de sous programme de l'odométrie pour ce modèle choisi est illustré dans la figure 5.36 ci-dessous.

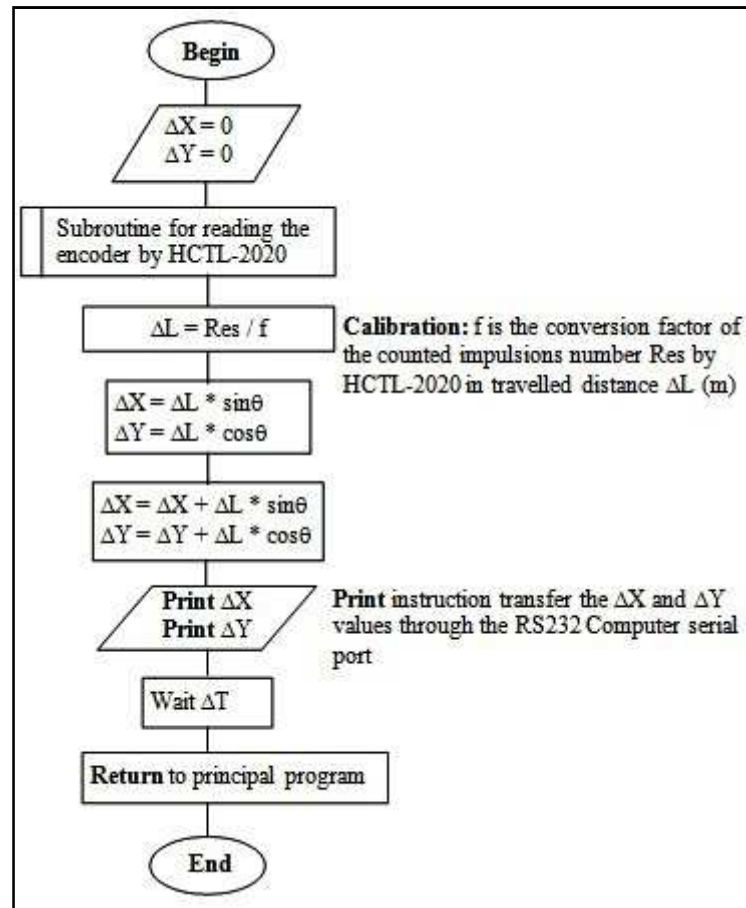


Figure 5.36 : Le sous programme d'odométrie du Robot-Véhicule conçu

Pratiquement, cette odométrie s'est effectuée à l'aide des deux (02) encodeurs optiques (incrémental/decrémental et angulaire) respectivement couplés

mécaniquement aux deux (02) moteurs à courant-continu de propulsion. L'encodeur angulaire, modèle **601-1045** de la compagnie VISHAY®, est couplé au moteur de direction. Sa sortie est connectée directement à l'entrée d'un canal de l'ADC à 10 bits de l'ATmega128-16 par l'intermédiaire d'un amplificateur opérationnel du circuit intégré LM6144 montés en suiveur de tension. L'autre encodeur dit incrémental de marque BOURNS®, de modèle **HTO ENC1J-D28-L00128**, est couplé au moteur de traction. Il fournit deux (02) séquences d'impulsions de codage quadratiquement décalées (*pour le sens de déplacement, la position ou vitesse*). Un circuit intégré HCTL-2020 sert d'interface entre l'encodeur incrémental et l'ATmega128-16. Ce circuit comporte un compteur/décompteur 16 bits permettant de déterminer la position du robot. Deux (02) photos de présentation de ce codeur angulaire VISHAY 601-1045 ("*Full 360° Smart Position Sensor*") minus de ses caractéristiques sont illustrées dans cette figure 5.37 ci-dessous.

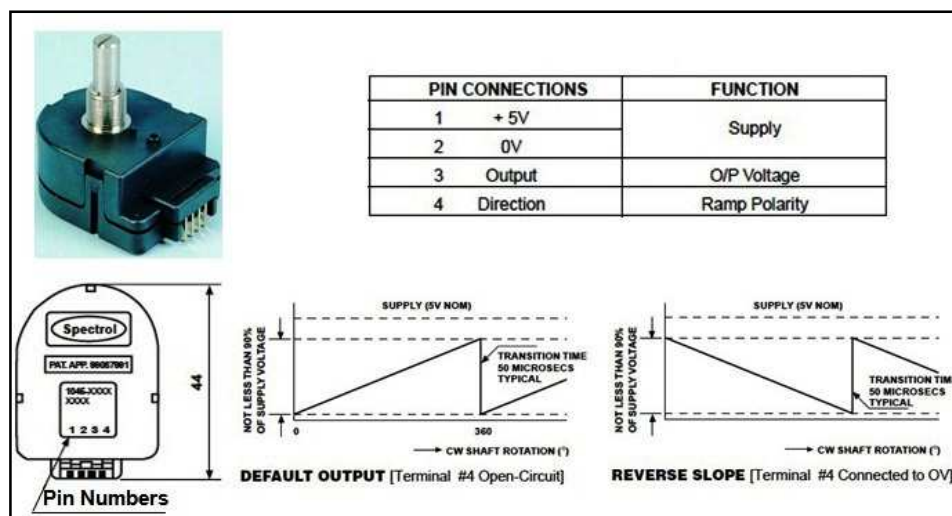


Figure 5.37: Les photos de présentation et caractéristiques du codeur VISHAY 601-1045

L'autre encodeur optique quadratique (incrémental) BOURNS® HTO ENC1J-D28-L00128 génère ou fournit deux (02) signaux de données (*02 data signals*) qui sont électriquement déphasés de 90° (*quadratique*) dont un cycle complet contient quatre (04) transitions des signaux. Ainsi, un encodeur qui génère 2500 cycles par révolution, fournit 10000 fronts des signaux ou comptes par révolution. On note que le sens du décalage de ces deux (02) signaux indique le sens de déplacement et le nombre d'impulsion. La figure 5.38 suivante donne un exemple de ces deux (02) signaux quadratiquement déphasés ainsi que le schéma synoptique d'interfaçage entre le décodeur HCTL-2020 et le microcontrôleur ATmega-128-16.

Informatiquement, les actions dans les étapes suivantes sont à faire pour pouvoir lire ce décodeur HCTL-2020 :

- en 1^{er}, on active (**enable en anglais**) le pin 4 /OE du circuit intégré en DIL HCTL-2020
- 2^{ème}, mise à zéro du pin 3 SEL (SEL = 0) permettant de collecter le bit du poids fort (MSB) compté de son Bus de Données (Data Bus)

- 3^{ème}, mise à l'état haut (1 logique) du pin 3 SEL (SEL = 1) permettant de collecter le bit du poids moins fort (LSB) de son Bus de Données (Data Bus)
- 4^{ème}, on désactive le décodeur HCTL-2020 par la mise en niveau haut son pin 4 /OE
- 5^{ème}, on calcule / affiche en suite le résultat de comptage en décimal (en additionnant le comptage MSB et LSB reçues) !
- finalement, on place dans le sous programme de lecture du HCTL-2020 les deux (02) lignes de remise à zéro (*dans ses places respectives appropriées*) selon nos besoins.

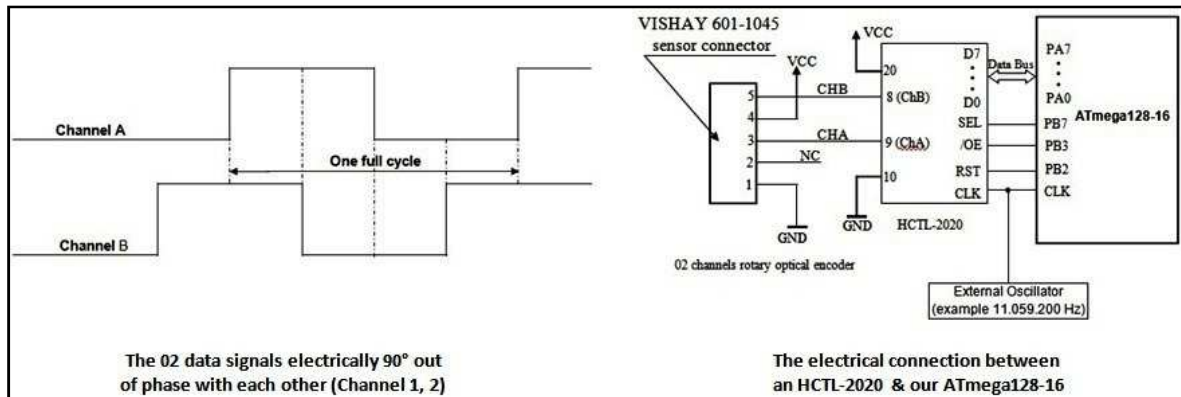


Figure 5.38 : Représentation des 02 signaux quadratiquement déphasés et schéma synoptique de l'interfaçage entre HCTL-2020 et ATmega128-16

L'initialisation des composants électroniques de ce prototype se fait dans le sous programme appelé "**Initialize_hardware**" suivante. Toutes les initialisations, que se soit pour les variables ou pour les instructions ont été groupées en majorité dans ce seul sous programme. Ce sous programme renferme aussi les configurations initiales nécessaires lors de l'utilisation des propriétés du microcontrôleur ATmega128-16 comme le **Timer1**, **ADC**, les ports d'entrées sorties Port B et Port D ; ainsi que la remise à zéro et désactivation de l'encodeur HCTL-2020. On note que ce sous programme est exécuté dès la mise sous tension de ce prototype de Robot-Véhicule et système. Et son algorithme se résume comme suit :

- Configurer le Timer 1 en mode générateur de signal modulé en largeur d'impulsion (*on peut aussi Configurer le Timer 2 en mode compteur ici*)
- Configurer le Port A de l'AT128 comme entrée
- Configurer le Port B de l'AT128 comme sortie
- Mettre la haute tension de polarisation des détecteurs G-M LND7313 à zéro
- Initialiser les variables Remote_flag, Speed_incr, Speed_decr et Direction_flag
- Désactiver HCTL2020 par mise à 1 du PortB3 (pin /OE), activer le PB2 (pin SEL) et mettre à 0 et mettre à 1 le PortB2 (pin RST)
- Mettre à zéro la variable Speed_cnt
- Attribuer la valeur de Stop_motor aux variables speed_pwm, Direction_pwm, Speed, Dir_Speed, Horp et Verv

- Initialiser les variables Str_buf, Str_input, et Str_gm, Str_rot, Str_turn, Str_speed et Str_sens

```

Sub Initialize_hardware()
  Dbg
  Config Timer1 = Pwm, Pwm = 8, Compare A Pwm = Clear Down, Compare B Pwm = Clear Down, Prescale = 64
  Config Porta = Input
  Config Portb = Output
  Set Portd.4           'Switch off the HV

  'Reset Pind.4
  Reset Remote_flag
  Reset Speed_incr
  Reset Speed_dacr
  Reset Direction_flag
  Set Portb.3           'disable OE
  Set Portb.7
  Set Portb.2
  Reset Portb.2         'Reset of optical rotary encoder HCTL-2020
  Set Portb.2

  Speed_cnt = 0

  Config Adc = Single, Prescaler = Auto
  Start Adc

  Speed_pwm = Stop_motor           'Stop motor speed
  Direction_pwm = Stop_motor       'Stop motor direction
  Speed = Stop_motor
  Dir_speed = 210
  Horp = Horizontal
  Verv = Vertical
  Str_buf = ""
  Str_input = ""
  Str_rot = ""
  Str_turn = ""
  Str_speed = ""
  Str_sens = ""
End Sub

```

Figure 5.39 : Le sous programme de configuration / initialisation des composants électroniques de la plateforme Robot-Véhicule

Le sous programme appelé "**Turn**" dans la figure 5.40 suivant permet à notre Robot-Véhicule de changer de direction en tournant sa roue avant d'une certaine valeur de l'angle défini par nous le concepteur.


```

Sub Tum()
'Dbg

Str_turn = ""
W7 = Getadc(direction) 'Read direction sensor
W7 = W7 - 42           'cancel sensor offset
A = W7 * 0.375         '1 bit = 0.357 degrees
E = Round(a)           'make integer
Str_turn = "D" + Str(e)
Teta = 0 + E
Alpha = Deg2rad(teta)

If Str_turn <> Turn_buffer Then
Print Str_turn
Waitms 50
Vcos = Cos(alpha)
Vsin = Sin(alpha)
End If
Turn_buffer = Str_turn

End Sub

```

Figure 5.40 : Le sous programme de rotation de la roue avant du Robot-Véhicule

Les sous programmes de lecture de l'encodeur et de calcul de la position du Robot-Véhicule par rapport à sa position de départ sont dans la figure 5.41 suivante.

<pre> Sub Read_rotary_encoder() 'Dbg Str_rot = "" Reset Portb.3 'enable OE Reset Portb.7 'SEL=0 enable to get MSB H_byte = Pina Set Portb.7 LSB L_byte = Pina Set Portb.3 'disable data out Res = H_byte * 256 Res = Res + L_byte If Speed_dir = 1 Then Resi = Resi + Res Else Resi = Resi - Res End If Resk = Res * 0.00018 Resj = Resi * 0.00018 Resf = Fusing(resj, "#.##") Str_rot = "P" + Resf If Str_rot <> Rot_buffer Then Print Str_rot Waitms 100 End If Rot_buffer = Str_rot End Sub </pre>	<pre> Sub Read_vehic_position() 'Dbg Str_h = "" Str_v = "" Vcos = Cos(alpha) Vsin = Sin(alpha) Horiz = Resk * Vsin Vertic = Resk * Vcos Horp = Horp + Horiz Verv = Verv + Vertic Resh = Fusing(horp, "#.##") Resv = Fusing(verv, "#.##") Str_h = "K" + Resh Str_v = "V" + Resv If Str_h <> H_buffer Then Print Str_h Waitms 100 End If H_buffer = Str_h If Str_v <> V_buffer Then Print Str_v Waitms 100 End If V_buffer = Str_v End Sub </pre>
---	---

Figure 5.41 : Les sous programmes sources en BASCOM-AVR de la lecture de l'encodeur et de calcul de position du Robot-Véhicule

5.2.8. Le logiciel d'interface utilisateur

Le programme d'interface utilisateur est écrit à l'aide du logiciel **CEC TestPoint 4.1** [1]. Ce programme permet de contrôler totalement toutes les fonctions du prototype Robot-Véhicule telles que l'accélération, le changement de direction aussi bien que l'affichage de tous les paramètres pertinents comme : le taux de comptage radioactif, la direction de la roue avant du robot, la vitesse, la distance parcourue, le graphe de sa position dans son environnement, la présence d'obstacles et finalement l'image de l'environnement en face transférée par un module de vidéo camera intégré dans le robot. Il sert, entre autres, d'interlocuteur à travers son interface, entre le manipulateur placé dans la station de contrôle et le système commandé Robot-Véhicule.

A chaque bouton de cette interface est associée une série de ligne de programme permettant à **CEC TestPoint 4.1** de se communiquer ensuite au Robot-Véhicule. Cette interface est présentée dans la figure 5.42 suivante.

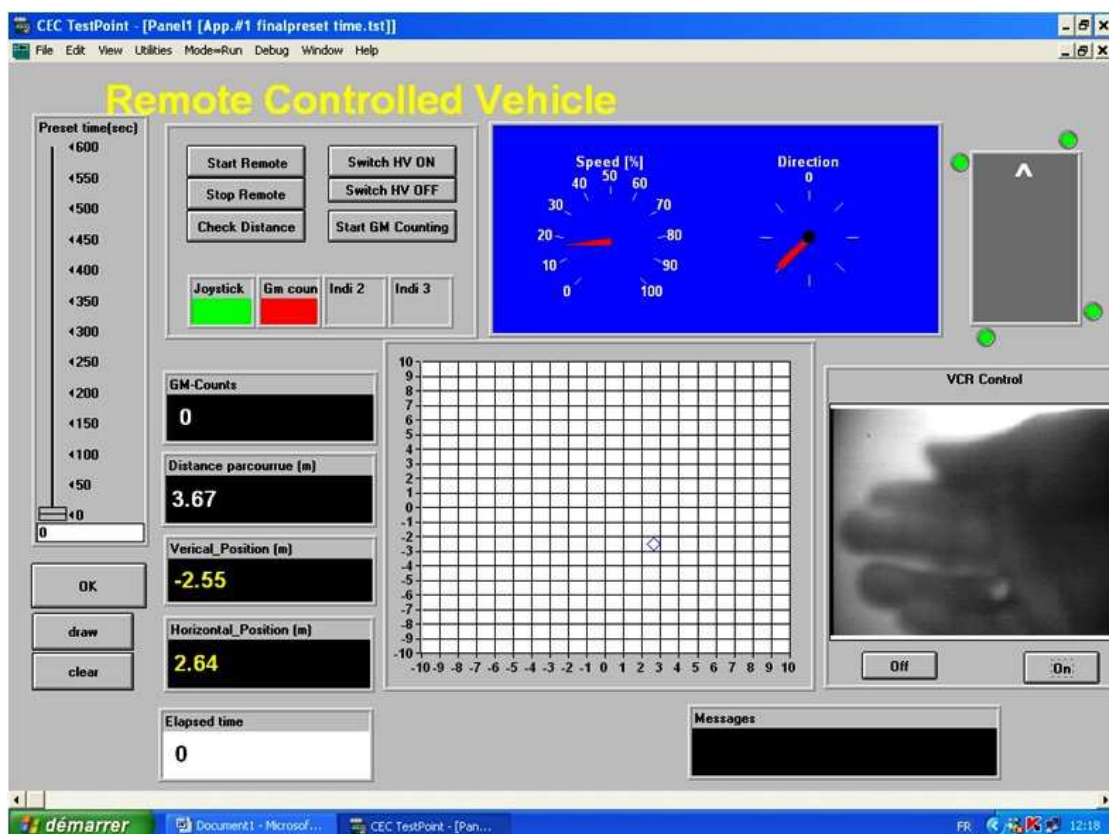


Figure 5.42 : Présentation du logiciel d'interface graphique utilisateur pour le prototype de Robot- Véhicule écrit à l'aide de l'outil CEC TestPoint version 4.1

Avec cet outil **CEC TestPoint 4.1**, on peut faire des tests, des mesures et des applications d'acquisition des données. Il a également les propriétés de contrôler des matériels externes, créer des interfaces utilisateurs, calculer et afficher des données, créer des fichiers de rapport et échanger des informations avec d'autres applications sur Windows. Avec cet outils, les routines de programmes sont déjà représentées par des icônes, et à chaque icône

sont associées des instructions qui leurs sont propres. Généralement, **CEC TestPoint 4.1** a des caractéristiques qui se résument comme suit :

✓ Instrument de contrôle

- librairies pour de nombreux instruments usuels
- support pour RS232

✓ Acquisition de données

- support pour des entrées et sorties analogiques ou numérique
- entrées et sorties numériques
- affichage numérique
- alarme de limitation
- barre d'indication de niveau
- disque d'enregistrement

✓ Analyse

- interpolation
- statistique : médiane, déviation, histogramme,...
- affichage de courbes.
- mathématique, il inclut les vecteurs, les tableaux, les déterminants,...

✓ Interface utilisateur

- boutons poussoirs, interrupteur, sélecteur,...
- panneaux multiples

CEC TestPoint 4.1 peut utiliser à la fois le port série COM et le port parallèle LPT d'un ordinateur. Il peut donc effectuer des calculs. Il peut aussi envoyer ou recevoir des données (*nombres, textes*) sur un port de communication d'un PC et attribuer un programme correspondant. La réalisation pratique d'une interface sur **CEC TestPoint 4.1** est assez facile car il existe déjà des boutons prédéfinis selon le besoin. L'affichage d'un résultat peut être numérique ou littéral.

Et L'explication du rôle et fonction de chaque bouton de cette interface est la suivante.

- **Initialize** : c'est la fenêtre de configuration des ports de communications RS232 et LPT ainsi que de l'initialisation (remise à zéro) des objets du programme

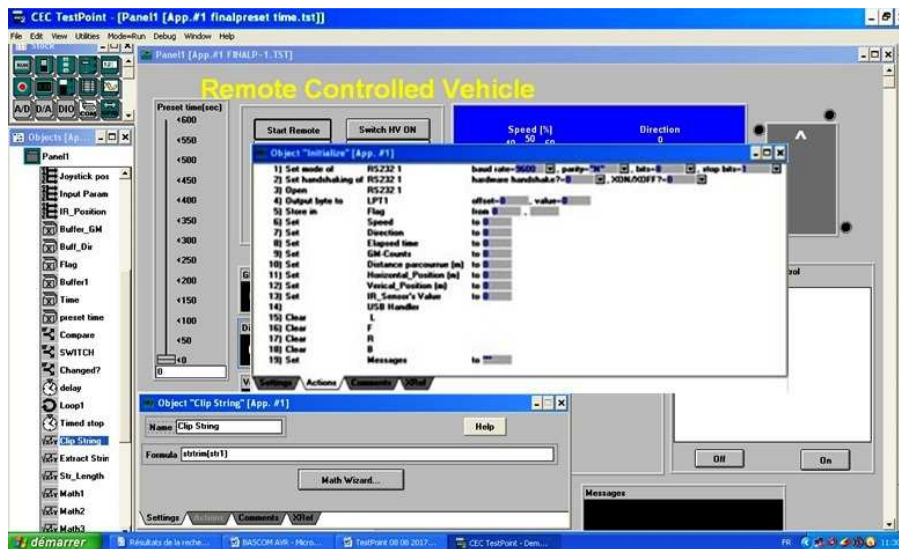


Figure 5.43 : Présentation de la routine d'initialisation du programme

- **Start Remote** : L'appui sur ce bouton envoie par le port série le caractère "**R**" permettant au prototype de Robot-Véhicule d'activer une partie du programme "Monitor" qui se trouve dans la mémoire du microcontrôleur ATmega128-16. Le microcontrôleur ATmega128-16 émet en retour à partir du module transmetteur le caractère "**O**" indiquant que l'information a été bien reçue. Le bouton **Start remote** rend active la manette de contrôle.



Figure 5.44 : La routine Start Remote

- **Stop Remote** : À l'inverse de **Start Remote** rend inactive la manette de contrôle et une partie du programme "Monitor".



Figure 5.45 : La routine Stop Remote

- **Preset time** : Ce curseur est introduit optionnellement pour permettre de sélectionner le temps de mesure pour le comptage de la radioactivité.
- **OK** : Ce bouton permet de stocker la valeur affichée par ce **Preset time** dans un " buffer ", un endroit de stockage de variable dans le logiciel **CEC TestPoint** pour une utilisation prochaine.
- **Switch on HV** : Ce bouton envoie le caractère "**H**" permettant au microcontrôleur ATmega128-16 du prototype du Robot-Véhicule d'activer la haute tension.
- **Switch off HV** : Ce bouton envoie le caractère "**Y**" permettant à ce microcontrôleur de mettre à zéro la haute tension.
- **Start GM Counting** : ce bouton active le **Timer2** du microcontrôleur ATmega128-16 dans le prototype qui par la suite effectue le comptage des événements radioactifs reçus par les détecteurs G-M LND7313 durant l'intervalle de temps sélectionné sur **Preset time**.
- **Elapsed time** : Affiche le temps écoulé pendant le comptage de la radioactivité.
- **GM count** : C'est un indicateur qui est au vert durant le mode comptage et en rouge dans le cas contraire.
- **Joystick** : C'est aussi un indicateur indiquant l'état actif ou inactif de la manette de contrôle.
- **Speed%** : cet instrument d'affichage indique que le véhicule est en mouvement et donne une indication sur la vitesse de celui-ci en pour cent.
- **Direction** : cet instrument d'affichage indique la direction ou l'angle de rotation de la roue avant de ce prototype de robot-véhicule. Sa valeur varie de 0 à 360°.
- **Message** : Il affiche les messages concernant le fonctionnement du véhicule comme " Stop " lorsque le véhicule est à l'arrêt.
- **VCR Control** : cette fenêtre affiche l'image de l'objet ou environnement en face du prototype de Robot-Véhicule. Ces 02 boutons **Off** et **On** (en dessous) permettent d'afficher les images en vidéo de l'objet ou l'environnement en face du prototype.
- Le bouton **draw** permet de tracer la courbe de trajectoire du prototype Robot-Véhicule ; le bouton **clear** efface et initialise cette courbe. Les fenêtres **GM-Counts**, **Distance parcourue (m)**, **Vertical_Position (m)** et **Horizontal_Position (m)** affichent respectivement la valeur de comptage globale de la radioactivité et la distance parcourue par ce prototype de Robot-Véhicule.



Figure 5.46 : La routine **Check Distance**

- Contrôle de port série RS232 1 :

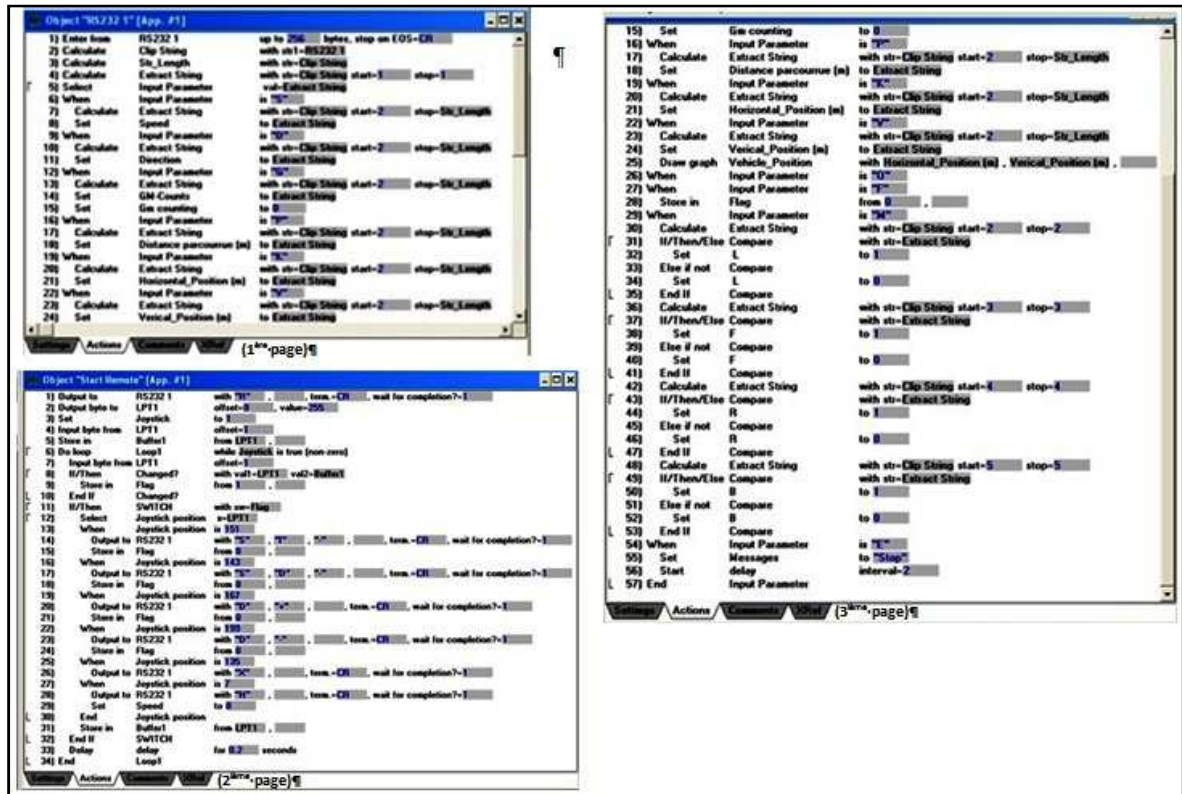


Figure 5.47 : La routine programme "Monitor" (côté PC)

Ces lignes de programme pour chacun de ses boutons de commande dans les fenêtres précédentes se reproduisent clairement à la page suivante.

5.2.8.1. Programme des actions sur CEC TestPoint pour L'interface Utilisateur

• Action Switch HV ON :

1)- Output to RS 232 1 With « Z », ,term=CR,Wait for completion=1

• Action Switch HV OFF :

1)- Output to RS 232 1 With "Y", ,term= CR, Wait for completion= 1

• Action Start GM Counting :

- 1)- Output to RS 232 1 With "G", ,term= CR, Wait for completion= 1
- 2)- Set GM Counting To 1
- 3)- Linear series Loop 1 From 0 to container 1, Step by 1
- 4)- Set Elapsed time To Loop 1

- | | | |
|-----------|-------------|----------------|
| 5)- Delay | Timed stop | T for 1 second |
| 6)- End | Loop 1 | |
| 7)- Set | Gm counting | To 0 |

• **Action Preset time(sec) :**

- | | | |
|--------------|-------------|------------------------|
| 1)- Store in | container 1 | From Preset time (sec) |
|--------------|-------------|------------------------|

• **Action OK :**

- | | | |
|---------------|----------|--|
| 1)- Store in | Time | From Preset time (sec) |
| 2)- Output to | RS 232 1 | With "T", Time , term=CR , Wait for completion=1 |

5.3. Présentation des deux prototypes réalisés

Les deux (02) figures 5.48 et 5.49 ci-dessous présentent les photos de vue de dessus, vue en perspective du prototype de Robot-Véhicule à tricycle ainsi que une vue en perspective du prototype de Robot-Véhicule à chenilles réalisés.

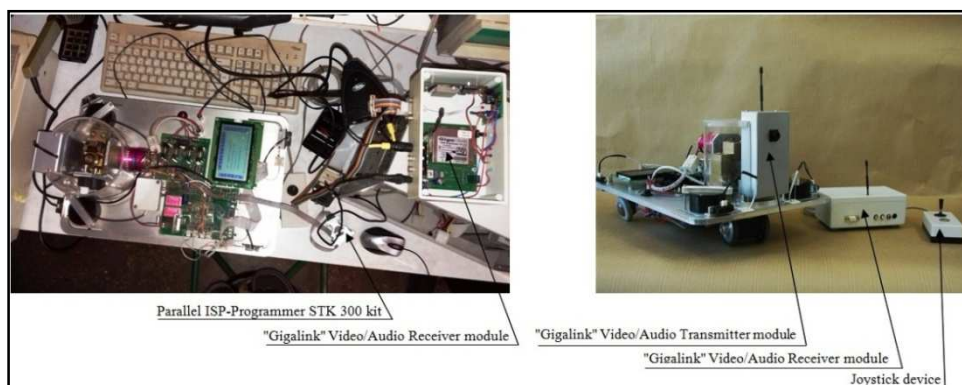


Figure 5.48 : Photos des vue de dessus et vue en perspective du prototype réalisé

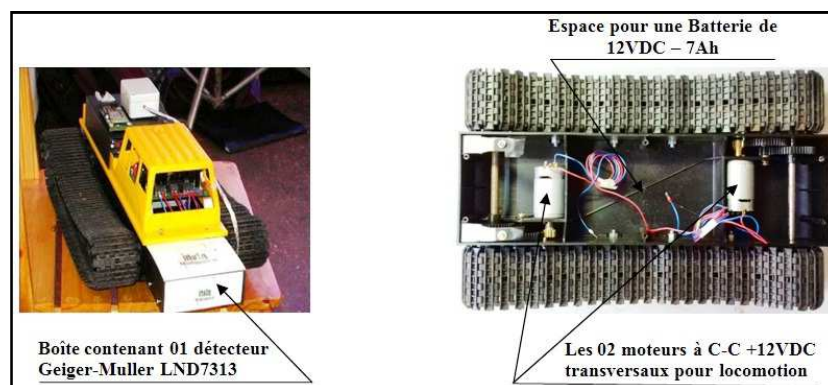


Figure 5.49 : Photos de présentation du prototype de robot mobile à chenilles

Chapitre 6 : Résultats sur les tests de mesure à distance de la radioactivité avec le Prototype

6.1. Méthodes utilisées sur les mesures expérimentales

6.1.2. Mesures de radioactivité avec le prototype de robot-véhicule

On a développé ce prototype de Robot-Véhicule pour déterminer à distance le taux de radioactivités d'une zone ou d'un endroit. Les mesures expérimentales ont été effectuées sur des sources radioactives standard scellées telles que le Cobalt-60 et le Césium-137 par le prototype qu'on a réalisé. La figure 6.1 ci-dessous montre la photo de la boîte contenant ces huit (08) sources radioactives standards scellées (^{241}Am , ^{133}Ba , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{54}Mn et ^{22}Na) d'activités initiales certifiées par l'AIEA à Vienne – Autriche en 01 Juillet 1983.



Figure 6.1 : Photo de la boîte contenant 08 sources radioactives standards scellées

Et on a comparé les valeurs mesurées par ce prototype avec celles mesurées à l'aide débitmètre analogique portatif "mini-con" series 1000 fabriqué en Grande Bretagne.

La consultation de la table des radionucléides permet de connaître la période radioactive de chaque source et leur mode de désintégration, ainsi que la valeur des énergies du rayonnement émis. On peut donc calculer l'activité de chaque source radioactive pour le jour de la mesure à partir de la formule de la loi de décroissance radioactive suivante :

$$A = A_0 \exp (- t \times \ln 2 / T) \quad (6.1)$$

Et le taux de comptage de radioactivité mesuré N (*exprimé en coups par seconde*) est calculé par la relation suivante :

$$N = \frac{\text{Nombres de coups} - \text{Bruit de fond}}{\text{Temps de mesure}} \quad (6.2)$$

Statistiquement, suivant la loi de Poisson, il faut effectuer des mesures allant jusqu'à 10.000 coups pour avoir une précision autour de 01%. On note que, en exception des bruits de fonds, toutes les mesures de la radioactivité ont été réalisées pendant un intervalle de temps fixe de 180 secondes et que toute la source radioactive standard à mesurer était verticalement placée sur le sol à 7cm du centre de ces deux (02) détecteurs Geiger-Muller LND7313. Cette valeur de temps de comptage de 180s a été choisie car elle n'est ni trop courte ni trop longue. On a effectué six (06) séries de mesures pour chaque source radioactive standard scellée et l'incertitude de mesure est ensuite calculée à partir de la formule de déviation standard en statistique, définie comme suit :

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.3)$$

Avec :

x_i : la valeur mesurée expérimentalement.

\bar{x} : la valeur moyenne des x_i

n : le nombre de mesures

Les séries des mesures présentées dans ce travail ont été effectuées en deux (02) périodes :

- Les premières (1^{ère}) séries de mesures ont été réalisées depuis 09 Décembre 2005.
- Les deuxièmes (2^{ème}) séries de contre mesures ont été réalisées en 12 Août 2016.

Suivantes sont les séries de mesures à distance de la radioactivité sur le prototype de robot-véhicule réalisé :

6.1.2.1. Mesures des bruits de fonds avec le prototype de Robot-Véhicule

Ces mesures sont effectuées à l'absence de la source radioactive. Le tableau 6.1 suivant représente les valeurs des bruits de fonds prises par le robot en 09 Décembre 2005 sur différent temps de mesures.

Tableau 6.1 : Valeurs des bruits de fonds prises en 09/12/2005 sur différent temps de mesures

Temps de mesure (s)	10	20	30	50	100	150	200	250	300
Nombre de coups (coups)	13	24	31	55	96	175	204	239	349
Nombre de coups par seconde (coups.s ⁻¹)	1.30	1.20	1.03	1.10	0.96	1.16	1.02	0.95	1.16
Incetitude (coups.s ⁻¹)	0.36	0.24	0.18	0.14	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06

6.1.2.2. Mesures des sources standards avec le prototype de Robot-Véhicule

Les premières (1^{ère}) séries de mesures à distance de la radioactivité effectuées en 09 Décembre 2005 avec le prototype sont dressées dans ce tableau 6.2 ci-dessous.

Tableau 6.2 : Séries de mesures à distance de la radioactivité effectuées en 09 Décembre 2005 avec le prototype sont dressées dans ce tableau 6.2 ci-dessous

	Nombre de coups collectés en 09 Décembre 2005 (coups)							
	Am-241	Ba-133	Co-57	Co-60	Cs-137	Eu-152	Mn-54	Na-22
1 ^{ère} mesure	6154	6543	240	6812	48117	40588	213	407
2 ^{ème} mesure	5834	6393	214	6732	48039	40220	219	448
3 ^{ème} mesure	6003	6427	191	6721	48054	39988	221	419
4 ^{ème} mesure	5850	6390	211	6695	48081	40022	192	392
5 ^{ème} mesure	5957	6418	215	6733	48328	39969	227	435
6 ^{ème} mesure	5948	6443	236	6757	48250	40249	189	442
Incertitude de mesure	287	56	17	39	117	236	15	21

6.1.2.3. Mesures des sources standards avec le "mini-con" series 1000

Le débitmètre "mini-con" series 1000 affiche le résultat de la valeur moyenne du taux de radioactivité des sources radioactives mesuré en coups par seconde. La fluctuation des valeurs autour d'une valeur nominale est visible par la variation de l'aiguille. Alors, on peut effectuer une mesure de dispersion par la formule :

$$\omega = X_{\max} - X_{\min} \quad (6.4)$$

Avec :

- X_{\max} : la valeur maximale
- X_{\min} : la valeur minimale

La figure 6.2 suivante donne une aperçue de ce débitmètre analogique portatif "mini-con" series 1000.

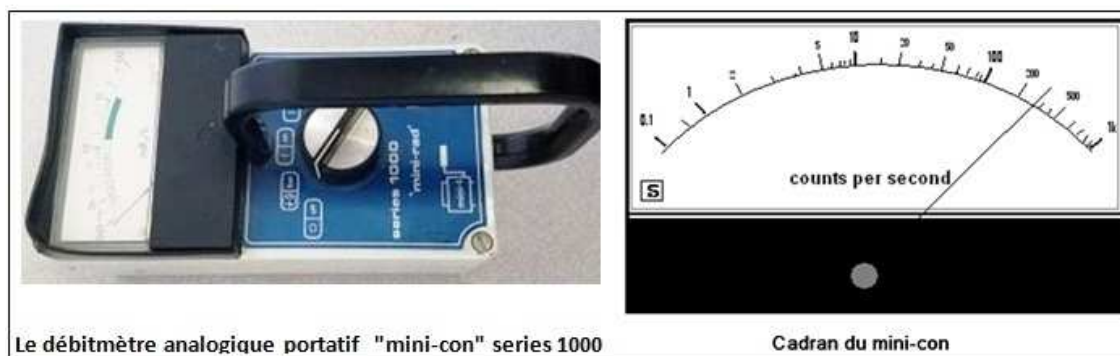


Figure 6.2 : Photo du débitmètre analogique portatif "mini-con" series 1000 et son cadran

6.1.2.4. Récapitulation des résultats de mesures de la radioactivité effectuées en 09 Décembre 2005

Des mesures comparatives de la radioactivité sur les sources radioactive standard scellées telles que le Co-60, le Cs-137, Am-241 et le Ba-133 ont été effectuées en 09 Décembre 2005 entre le prototype de robot véhicule et un dosimètre analogique portatif "mini-con series 1000". Toutes les mesures ont été faites pendant un intervalle de temps régulier de 180s. Et que toute source radioactive standard scellée à mesurer est verticalement placée sur le sol à 7cm du centre Ces résultats de mesures sont récapitulés dans le tableau 6.3 et la courbe dans la figure 6.3 suivants.

Tableau 6.3 : Résultats des mesures comparatives entre le robot et le dosimètre analogique "mini-con series 1000" (09 Décembre 2005)

Temps de mesure (Preset Time) = 180 s	Am-241	Co-60	Cs-137	Eu-152
Comptage avec Robot-Véhicule en 09 Déc. 2005 (coups)	5776	6561	47965	39992
Taux de comptage mesuré avec Robot-Véhicule en 09 Déc. 2005 (cps)	31	36	266	222
Taux de comptage mesuré avec "mini-con series 1000" en 09 Déc. 2005 (cps)	30	40	300	290
Activité initiale certifiée le 01/07/1983 (kBq)	335	409,5	448,5	408,4
Activité estimée lors de la mesure en 09/12/2005 (kBq)	323,2	21,4	267,4	129,4
Période radioactive (demi-vie), a : année, j : jour	432,20y	5,27y	30,07y	13,54y
Energie du rayonnement γ (keV)	γ_1 60 γ_2 26	γ_1 1332 γ_2 1173	662	γ_1 122 γ_2 842

La figure 6.3 ci-dessous représente graphiquement les différences entre les mesures de la radioactivité effectuées en 09 Décembre 2005 avec le prototype de Robot-Véhicule et celles effectuées avec le dosimètre analogique portatif "mini-con series 1000"

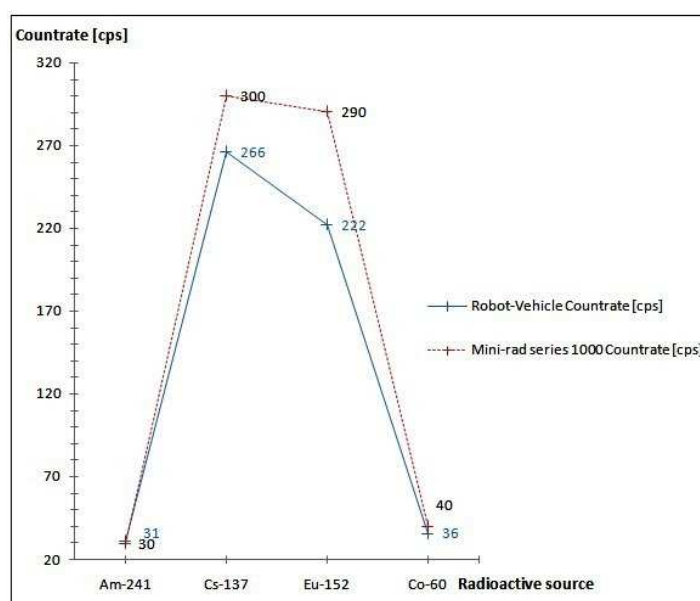


Figure 6.3 : Représentation graphique des différences entre les mesures effectuées en 09/12/2005 avec le robot véhicule et le "mini-con series 1000"

6.1.2.5. Récapitulation des résultats de contre-mesures de la radioactivité effectuées en 12 Août 2016

Des contre-mesures comparatives de la radioactivité sur ces sources radioactive standard scellées telles que le Co-60, le Cs-137, Am-241 et le Ba-133 ont été effectuées en 12 Août 2016 entre le prototype de robot véhicule et le débitmètre analogique portatif "mini-con series 1000". Toutes les mesures ont été aussi faites pendant un intervalle de temps régulier de 180s. Et que toute source radioactive standard scellée à mesurer est toujours verticalement placée sur le sol à 7cm du centre. Ces résultats de mesures sont récapitulés dans le tableau 6.4 et la courbe dans la figure 6.4 suivants.

Tableau 6.4 : Résultats des contre-mesures comparatives entre le robot et le débitmètre analogique "mini-con series 1000" (12 Août 2016)

Temps de mesure (Preset Time) = 180 s	Am-241	Co-60	Cs-137	Eu-152
Comptage avec Robot-Véhicule en 12 Août 2016 (coups)	5680	1706	29448	24111
Taux de comptage mesuré avec Robot-Véhicule en 12 Août 2016 (cps)	30	09	162	134
Taux de comptage mesuré avec "mini-con series 1000" en 12 Août 2016 (cps)	28	11	179	172
Activité initiale certifiée le 01/07/1983 (kBq)	335	409,5	448,5	408,4
Activité estimée lors de la mesure en 12 Août 2016 (kBq)	317,6	5,3	209,0	74,9
Période radioactive (demi-vie), a : année, j : jour	432,20y	5,27y	30,07y	13,54y
Energie du rayonnement γ (keV)	γ_1 60 γ_2 26	γ_1 1332 γ_2 1173	662	γ_1 122 γ_2 842

La figure ci-dessous représente graphiquement les différences entre les mesures de la radioactivité effectuées en 12 Août 2016 avec le prototype de Robot-Véhicule et celles effectuées avec le débitmètre analogique portatif "mini-con series 1000"

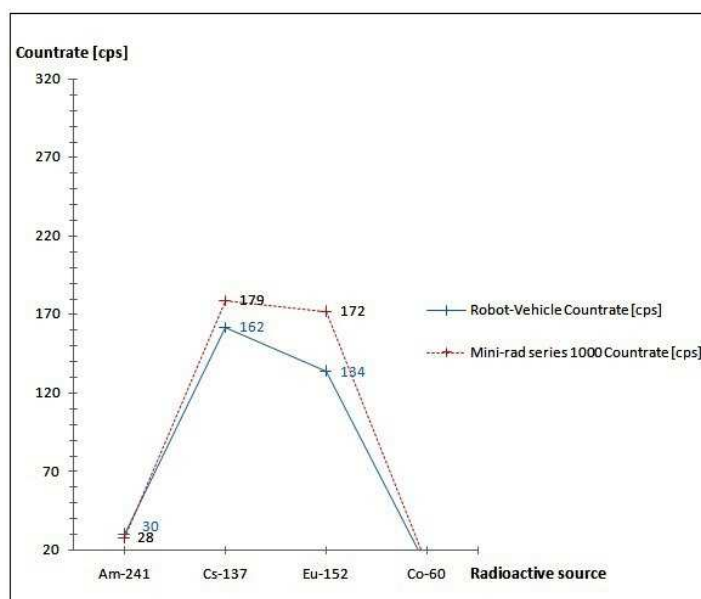


Figure 6.4 : Représentation graphique des différences entre les mesures effectuées en 12/08/2016 avec le robot véhicule et le débitmètre "mini-con series 1000"

6.1.2.6. Comparaison entre la mesure de distance parcourue par le prototype mesurée avec une règle graduée et celle de l'odomètre

La figure 6.5 suivante représente graphiquement des écarts entre la mesure des distances parcourues par le prototype de Robot-Véhicule développé (en mètre) mesurées avec une règle graduée et celles mesurées avec l'odomètre intégré dans le prototype.

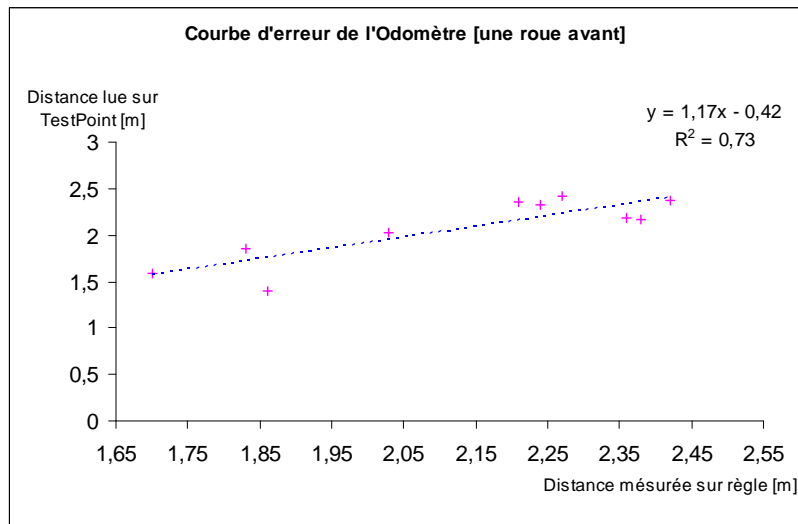


Figure 6.5 : Courbe comparative des distances parcourues par le robot mesurées avec une règle graduée et celles mesurées avec l'odomètre du prototype réalisé

Chapitre 7 : Discussion et Conclusion

7.1. Discussion

Se plaçant dans le contexte de renforcement des capacités des techniciens dans les pays en voie de développement en matière de conception et développement des instruments nucléaires modernes et éducatifs qui s'adaptent à leurs besoins et situations : la réalisation, les essais, et les mesures effectuées montrent la qualité et l'état de fonctionnement de la conception (cf. **fig. 5.3** & **fig. 5.48**). Le poids total du robot est de 10kg. Il est principalement constitué d'une plate-forme en alliage d'acier de 10mm d'épaisseur dont la dimension est de 450 × 300 mm². Ce prototype de robot mobile est donc robuste et opérationnel. Le sous programme de contrôle de position travaille en boucle ouverte, c'est-à-dire : le chemin que devrait suivre le robot pour atteindre un endroit voulu est aléatoire. L'expérience qu'on a faite (cf. **fig. 6.5**) montre qu'il n'est pas possible de connaître précisément la position du robot dans son environnement en mesurant les angles de rotations de la roue avant à l'aide de ces deux (02) encodeurs optiques. Ceci est dû aux phénomènes de dérive du robot véhicule lors de son déplacement. Principalement, ces phénomènes sont les erreurs systématiques générées par les encodeurs optiques et le glissement des roues sur sol. L'intégration de petits déplacements, selon le modèle géométrique classique qu'on a utilisé, intègre aussi l'erreur ce qui fait que l'erreur de position croît avec le temps. C'est pour faire face à ce problème qu'on a monté à bord du prototype de Robot-Véhicule conçu le module camera de surveillance. Il se servira comme un asservissement visuel pour mieux diriger le robot vers l'endroit précis à atteindre. Les résultats montrent également qu'il y a une corrélation entre les mesures de la radioactivité à distance effectuées avec le prototype de robot-véhicule de type tricycle réalisé et celles effectuées avec le dosimètre analogique portatif "mini-con series 1000" (cf. **Tableaux 6.3**, **fig. 6.3** et **Tableau 6.4**, **fig. 6.4**).

7.2. Conclusion et perspective

Personnellement, mon idée de concevoir et réaliser un prototype de Robot-Véhicule capable de mesurer et de scanner à distance une surface contaminée radioactivement a commencé dès l'année 1998, durant mon stage de formation au Laboratoire de l'AIEA à Seibersdorf, Vienne, Autriche. On nous a distribué au cours de ce stage quelques brochures sur les actualités dans les développements et marchés des instruments de surveillance de la radioactivité (*Radiation Monitoring Equipements*). Un système RAM-UGV de ROTEM Industries LTD. de l'Israël faisant partie de ces brochures (cf. **fig. A.1** et **fig. A.2** dans l'Annexe A).

Et de là, vers la fin de l'année 2002, j'ai réalisé mon premier projet de conception d'un prototype de Robot-Véhicule unidirectionnel minus d'un détecteur Geiger-Muller abord capable de mesurer à distance la radioactivité de l'endroit où il se trouve. Un microcontrôleur à 8-bit de Motorola MC68HC11E2 disposant 02 kOctets d'EEPROM interne est le cœur de son système. Quatre (04) boutons poussoirs (02 en avant et 02

derrière) sont utilisés comme détecteurs d'obstacles (fins de courses). Deux (02) paires des émetteurs –récepteurs Infrarouges ont été utilisés pour la transmission à distance des données entre ce robot et un ordinateur de contrôle muni d'un logiciel d'interface utilisateur. Un moteur pas-à-pas est monté dans ce prototype pour sa locomotion. Et un afficheur LCD 2×16 est monté à son bord pour l'affichage des résultats de comptage et distance parcourue (cf. **fig. B.1**, **Fig. B.2** et **fig. B.3** dans l'Annexe B). Ce projet de développement s'est arrêté car non seulement à cause des difficultés rencontrées sur l'existence locale des composants nécessaires pour son développement, mais le rayonnement infrarouge sont facilement arrêtés par une simple barrière et que sa portée est limitée.

Cette expérience m'a permis de se relancer en 2004 dans un autre projet d'études sur la conception et réalisation d'un prototype d'un Robot-Véhicule, à base d'un autre microcontrôleur Flash – AVR - Atmel 8-bit ATmega128L, contrôlé par des liaisons Radiofréquences, détecteur d'une surface radioactivement contaminée.

La totalité de ce dernier travail a été réalisé en trois (03) étapes :

- La première (1^{ère}) étape c'est la phase de l'étude de faisabilité et conception du système à réaliser. Elle concerne la forme de la plateforme du prototype de Robot-Véhicule, son architecture mécanique ainsi que la mise en place des différents modules sur le système. C'est à dire, le côté pratique du travail dans lequel il a fallu de bonnes idées. En effet, la présentation du système exige le professionnalisme. Les obstacles furent donc nombreux pendant le développement.

De ce fait, on a recouru à plusieurs modèles pour aboutir à cette forme de prototype actuelle du Robot-Véhicule de type tricycle qui me semble présentable, flexible et appropriée pour une plateforme d'un instrument scientifique de recherches (*au sens de l'interchangeabilité des composants qui le forme, tels que : cartes électroniques, senseurs, détecteurs, ... avec d'autre plateforme d'un Robot de recherches*).

- La deuxième (2^{ième}) étape fut consacrée sur la conception et réalisation du système électronique et mécanique du prototype. C'était l'étape la plus longue et nécessite beaucoup d'attention et assurance. Puisque on devrait s'assurer que tous les schémas électroniques des cartes conçues sont vrais, sans fautes et que ses circuits imprimés correspondants sont tracés et développés selon la règle de l'art. On a écrit ensuite des programmes correspondants aux applications voulues à l'aide du logiciel de développement BASCOM-AVR et de l'HyperTerminal de Windows XP pour les tests et mise au point pour le bon fonctionnement de l'ensemble. Des corrections et améliorations ont été apportées sur la partie logicielle et la partie matérielle. Car, des erreurs de programmes conduisaient quelquefois à des problèmes matériels aussi (comme destruction d'un circuit intégré HIP4082 pilote des transistors FETs montés en Full Bridge ou simplement coupure d'un fusible de protection). On a étudié ensuite la forme de la fenêtre du logiciel d'interface utilisateur dont le programme est écrit à l'aide du logiciel CEC TESTPOINT version 4.1. Ce programme permet de contrôler totalement toutes les fonctions du prototype du Robot-Véhicule réalisés telles que l'accélération, le changement de direction aussi bien que l'affichage de tous les paramètres pertinents comme : le taux de comptage radioactif, la direction de la roue avant du robot, la vitesse, la distance

parcourue, le graphe de sa position dans son environnement, la présence d'obstacles et finalement l'image de l'environnement en face transférée par un module de vidéo camera intégré dans le robot.

- La dernière étape est la vérification expérimentale du système. Les mesures comparatives de mesures à distance de la radioactivité ont été faites sur la source scellée standard de ^{60}Co et bien d'autres. Ces mesures ont démontré que le système réalisé est tout à fait capable de déterminer et de distinguer l'état radioactif d'un milieu, son niveau de radioactivité ; mais il ne peut pas déterminer le mode de désintégration existant car on ne peut pas faire de la spectrométrie avec ces détecteurs Geiger-Muller LND7313 montés abord de ce prototype.

7.3. Perspective

Le domaine d'utilisation de ce prototype est actuellement limité dans le sol cimenté comme de notre laboratoire de l'INSTN - Madagascar. On est encore en phase de la recherche et de son amélioration possible. Comme exemple, le système de détection des rayonnements ionisants (*basé sur les deux (02) détecteurs Geiger-Muller LND7313*) monté abord du prototype réalisé n'est pas encore étalonné. Son étalonnage au Laboratoire **SSDL** (Secondary Standards Dosimetry Laboratory) de l'INSTN - Madagascar fera l'objet d'un article scientifique qu'on va publier dans un journal de notoriété internationale.

La plateforme **Arduino** est à base des séries de l'ATmega328+. Robot Humanoïde et Drone à base de l'**Arduino** ou de microcontrôleur **ATmega128** sont d'actualité maintenant, en plus de **FPGA**. Les microcomposants tels que micro-détecteurs nucléaires NaI(Tl), micro senseurs Ultrasons et micro senseurs Radar d'anticollision, etc. ... existent maintenant sur nos marchés locales.

Comme perspective, on va s'aventurer sur ces voies dans l'avenir, c'est-à-dire développer un prototype de Robot Humanoïde Nucléaire ou/et un prototype de drone de cartographie nucléaire. Ce seront nos objectifs et nos sujets de recherches dans l'avenir.

**ANNEXE A : Copie d'une brochure sur le système
"RAM-UGV" par ROTEM Industries LTD.,
en Israël (1998)**

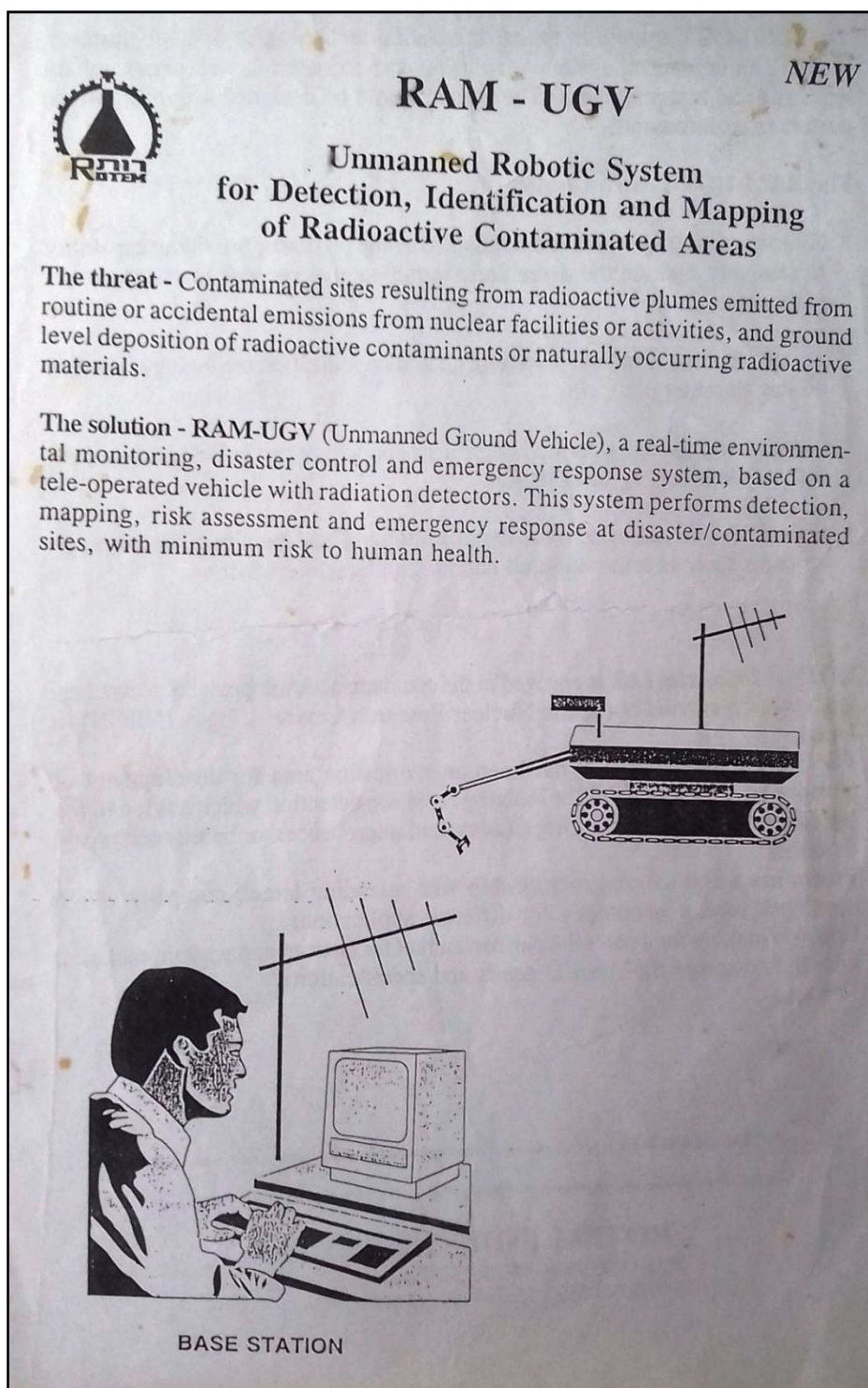


Figure A.1 : Copie de la 1^{ère} page d'une brochure de publicité sur système RAM-UGV, commercialement développé par ROTEM Industries LTD. En Israël

The **RAM-UGV** system is based on existing technologies and sub-systems, creating an unmanned system which prevents the need to risk personnel for detecting and mapping tasks. The system would be designed according to the customer requirements.

The **RAM-UGV** system consists of:

- * A computerized kit which can be adapted to any platform, providing capability to remotely operate the drive and the radioactive sensors installed on the platform.
- * A combined set of radiation detectors based on ionization technology installed on the mapping platform.
- * A computerized tele-operated control station which can collect and process the radiation survey information.
- * Growth option - the system has the capability to be adapted to different clean-up tasks such as removing and handling radioactive waste.

ROTEM Industries Ltd. is engaged in the commercial development of technological research carried out at the Nuclear Research Centre - Negev (NRCN) in Israel.

For many years the NRCN has been on-site testing area for development of advanced instrumentation, for ionizing radiation detection which has led to the introduction and manufacturing of advanced microprocessor based meters and detectors.

Rotem has a commercial relationship with a leading Israeli company which developed such a technology for different applications.

Rotem is looking for a potential partner/market for such an application, to design with the customer the specific needs and specifications.

ROTEM INDUSTRIES reserves the right to change specifications without advance notice

Further enquiries are encouraged. Please write to the address below, or call direct:

ROTEM INDUSTRIES LTD.

P.O. BOX 9046, BEER-SHEVA 84190, ISRAEL

TEL: 972-7-568300/568246, FAX: 972-7-554502/568005

Figure A.2 : Copie de la 2^{ème} page d'une brochure de publicité sur système RAM-UGV, commercialement développé par ROTEM Industries LTD. En Israël

ANNEXE B : Copies des photos de présentation du projet 2002 sur "Prototypage d'un petit Robot-Véhicule de mesure à distance de la radioactivité"



Figure B.1 : Copie d'une photo de couverture d'un rapport sur la situation de la conception d'un prototype d'un petit robot-véhicule de mesure à distance de la radioactivité, contrôlé par une liaison Infrarouge

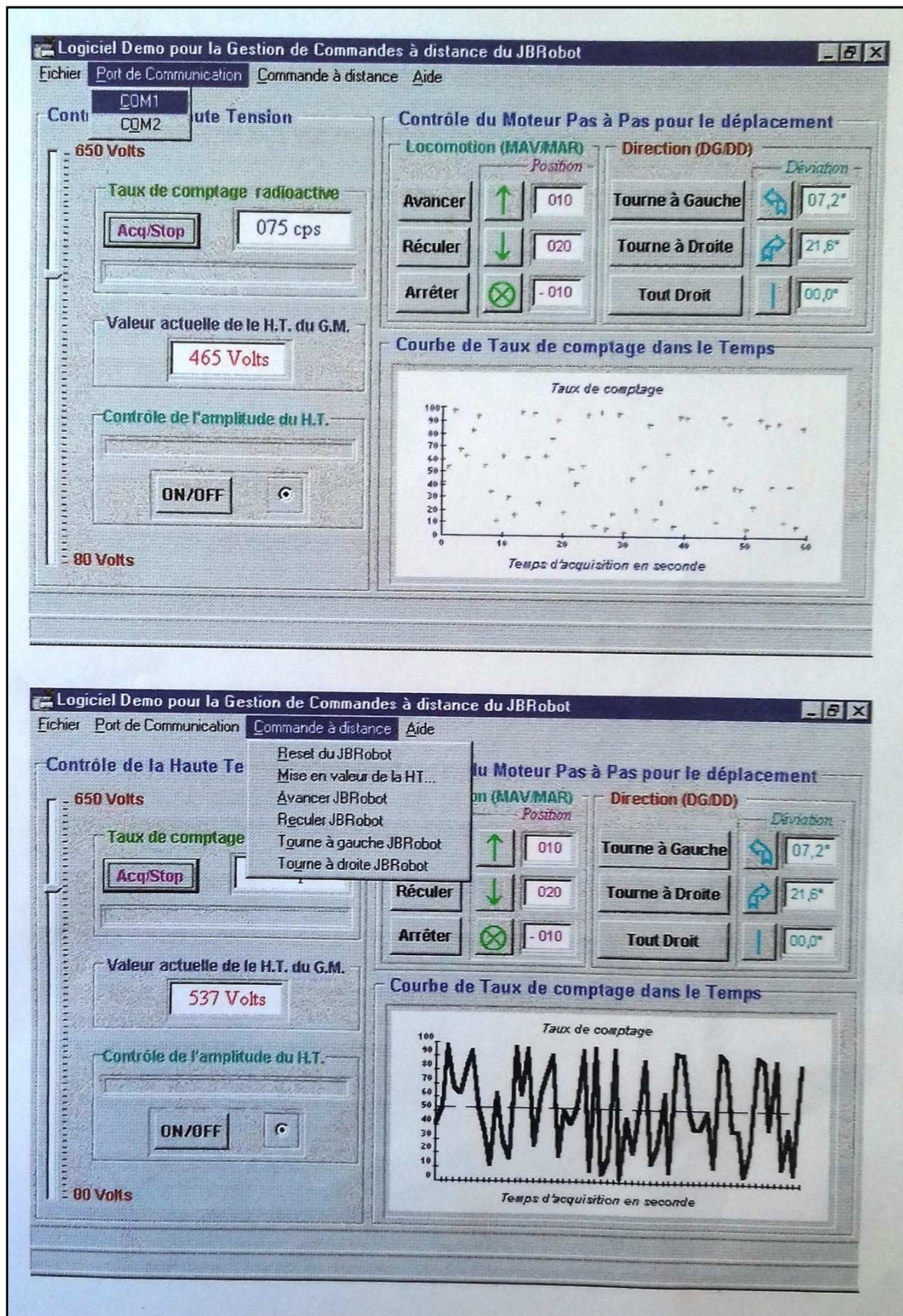


Figure B.2 : Copie d'une photo de présentation d'une fenêtre du logiciel d'interface de ce prototype d'un robot-véhicule contrôlé par une liaison IR (1/2)

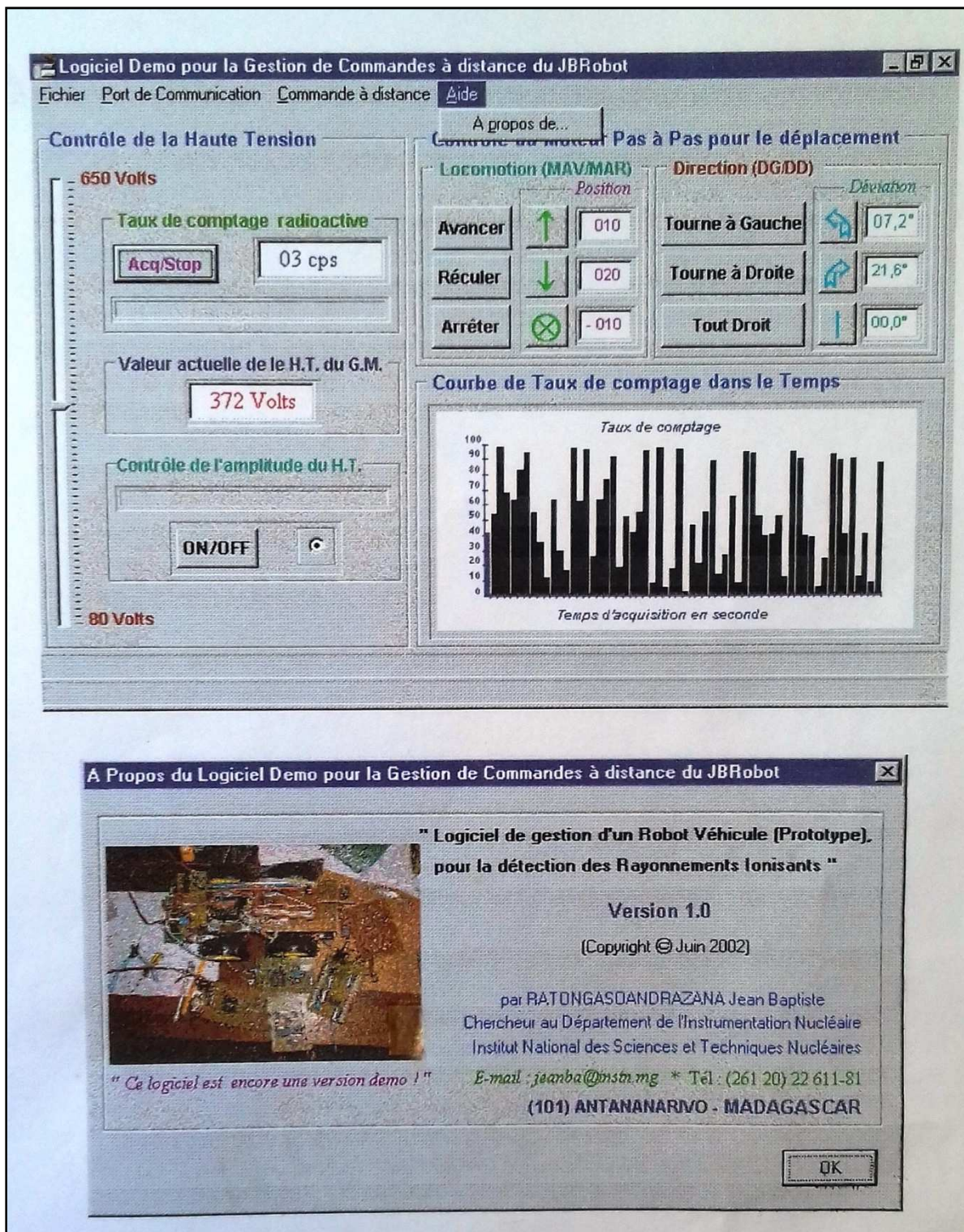


Figure B.3 : Copie d'une photo de présentation d'une fenêtre du logiciel d'interfaçage de ce prototype d'un robot-véhicule contrôlé par une liaison IR (2/2)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Capital Equipment Corporation (2001). Book. "TestPoint TM Software User's Guide", Vol. 2, Seventh Edition.
- [2] Duval Jean-Pierre. "Compilateur et Système de Développement BASIC BASCOM-AVR ou apprendre à programmer les microcontrôleurs RISC de l'Atmel, Version 1.11.7.0" (PDF).
- [3] Forschungszentrum Karlsruhe (1998). "Table des radionucléides". Handbook.
- [4] <http://www.Indinc.com/gm/alpha/7313.htm>. "LND 7313: A Pancake Mica Window-Alpha-Beta-Gamma Geiger Müller detector".
- [5] www.atmel.com/literature, "Datasheet of Atmega128L, a 8-bit AVR® Microcontroller with 128K Bytes In-System Programmable Flash memory", revision 2467J-AVR-12/03.
- [6] www.egr.msu.edu/classes/ece480/.../app_note_s11_dt5_kenji.pdf, "A Quick Guide to PCB Design in EAGLE", Application Note, April 2011.
- [7] Gage, Douglas (Summer 1995). "UGV HISTORY 101: A Brief History of Unmanned Ground Vehicle (UGV) Development Efforts" (PDF). Unmanned Systems Magazine. 13 (3). Retrieved 3 September 2016.
- [8] Hebert Martial, Thorpe Charles, Stentz Anthony (2007). "Intelligent Unmanned Ground Vehicles". Volume 388 of the series The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Springer. pp. 1–17. ISBN 978-1-4613-7904-1. Retrieved 3 September 2016.
- [9] www.issuelab.org/resources/21683/21683.pdf . "Drones for Disaster Response and Relief Operations" (PDF). April 2015.
- [10] Siciliano Bruno, Khatib Oussama (2016). "Springer Handbook of Robotics". Springer. ISBN 9783319325521. Retrieved 3 September 2016.
- [11] Paul R. Steinmeyer, Health Physicist. "G-M Pancake Detectors: Everything You've Wanted to Know (But Were Afraid to Ask) " (PDF). RSO Magazine, Volume 10, N° 5. 2005.
- [12] www.mirion.com/.../rds-80-radiation-contamination-survey/RDS_80A_Manual_v102.pdf, "RDS-80A Contamination Meter Users Manual Version 1.02" (PDF). Document No. 2096 5741, Issue date: 29th September 2009.
- [13] "The 7th IARP Workshop HUDEM'2008 Final Program, 28-30 March, 2008, AUC, Cairo" (PDF).
- [14] Jong Hoon Ahnn. "The Robot control using the wireless communication and the serial communication" (PDF). Design Project Report for Master of Electrical Engineering Program at Cornell University. Degree date: May 2007.
- [15] Nabil Ounoughi (2014/2015). "Polycopie de cours, matière: Instrumentation". Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel, Algérie

Titre de thèse : "Prototypage d'un Robot Véhicule contrôlé par une liaison Radio Fréquence pour scanner une surface radioactive contaminée"

Résumé :

Les rayonnements ionisants ne sont pas perceptibles directement par les organes de sens de l'homme. En effet, les travaux d'intervention et de manipulation des sources de ces rayonnements ionisants présentent des risques d'accident très grave et souvent irréversibles pour l'organisme humain. Les travaux d'expérimentation et de maintenance dans de telle zone présentent aussi des risques nécessitant un minimum de précaution. Ainsi, le but de ce travail est de concevoir et de mettre au point un prototype d'un robot mobile de type véhicule télécommandé muni des détecteurs de sources de rayonnements ionisants Alpha, Bêta et Gamma pour surveiller à distance le taux de radioactivité d'une zone contaminée. Développé autour d'un **AVR-RISC** microcontrôleur Flash 08-bits **ATmega128**, l'électronique du système utilise des composants commerciaux d'actualité existants et à prix modérés. Une caméra de surveillance incorporée, couplée avec un transmetteur vidéo, permet de mieux diriger le Robot vers un endroit précis à atteindre. Ce Robot détecte, mesure et évalue automatiquement les doses des rayonnements captées en un endroit bien déterminé de son environnement avec une sensibilité au rayonnement Gamma pour une source de ^{60}Co de 58 cps/mR/hr et un bruit de fond minimal de 01impulsion par seconde. Les informations de navigation et les données collectées sont transmises vers le centre de commande par des ondes hertziennes.

Mots-clés : ATmega128, détecteurs Geiger Müller, Robotique, microcontrôleur, radioactivité

Thesis title: "Prototyping of Radio Frequency controlled Robot Vehicle to scan radioactive contaminated areas"

Abstract:

The ionizing radiations are not directly audible by the organs of sense of the human being. Maintenance and handling of sources of such ionizing radiations present some risks of very serious and often irreversible accident for human organism. The works of experimentation and maintenance in such zone also present the risks requiring some minimum of precaution. Thus, the main objective of this work is to design and develop (hard- and software) a prototype of educational semi-autonomous Radio Frequency controlled robot-vehicle based on 8-bit AVR-RISC Flash microcontroller system (ATmega128L) able to detect, identify and map the radioactive contaminated area. An integrated video camera coupled with a UHF video transmitter module, placed in front of the robot, will be used as visual feedback control to well direct it toward a precise place to reach. The navigation information and the data collected are transmitted from the robot toward the Computer via 02 Radio Frequency Transceivers for peer-to-peer serial data transfer in half-duplex mode. A Joystick module which is connected to the Computer's parallel port allows full motion control of the platform. Robot-vehicle user interface program for the PC has been designed to allow full control of all functions of the robot vehicles.

Keywords: ATmega128, LND7313 Geiger Muller detector, Robotics, microcontroller, radioactivity.

Nom de l'impétrant :

RATONGASOANDRAZANA Jean Baptiste
E-mail : ratongasoarjb@yahoo.com
Tél. : + 261 32 46 327 08

Directeur de thèse :

Pr. RAMBOLAMANANA Gérard
Professeur titulaire à la Faculté des Sciences
Université d'Antananarivo