

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **SCIENCE** DE L'ENVIRONNEMENT

المكتبة
PROJET DE FIN D'ETUDES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

SUJET

EVALUATIONS QUALITATIVES ET QUANTITATIVES DES
CONCENTRATIONS EN TRITIUM DANS LES EAUX
SOUTERRAINES, PLUVIALES, MARINES ET
POTABLES PAR LES TECHNIQUES DE COMPTAGE
PAR SCINTILLATION LIQUIDE

Proposé par :
M^r A. ZITOUNI

Etudié par :
R. BOUDJELLA

Dirigé par :
M^{lle} A. BENAMRANE
L. HAIDER
M^{rs} M. TAHTAT
B. YAGOUBI

PROMOTION : **JUIN 85**

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT **C**IENCE DE L'ENVIRONNEMENT
PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

EVALUATIONS QUALITATIVES ET QUANTITATIVES
DES CONCENTRATIONS EN TRITIEM DANS LES EAUX
SOUTERRAINES, PLUVIALES, MARINES ET
POTABLES PAR LES TECHNIQUES DE COMPTAGES
PAR SCINTILLATION LIQUIDE

Proposé par :
M^r. A. ZITOUNI

Etudié par :
R. BOUDJELLA

Dirigé par :
M^{lles} A. BENAMRANE
L. HAIBER
M^r. M. TAHTAT
B. YAGOUBI

PROMOTION : JUIN 1985

*A la mémoire de mon Père,
A ma tendre et douce mère et mes frères et soeurs
A qui je dois tant de sacrifices,
A mes neveux et nièces,
A tous mes amis (e),
A mes amis de Génie-Civil,
d'Electronique et de Génie-
Sanitaire.*

Que tous trouvent ici l'expression de mes plus nobles sentiments.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur A. NAAMANE, Chef du Département du Génie de l'Environnement, pour l'appui bienveillant qu'il m'a accordé tout au long de ce travail.

Je témoigne ma profonde gratitude à Monsieur A. ZITOUNI, Chargé de Recherches au Commissariat aux Energies Nouvelles d'Alger, dont la compétence et l'inlassable sollicitude ont été pour moi un précieux recours.

J'adresse mes brefs remerciements à Monsieur B. YAGHOUBI, Responsable de la Division Détection des Rayonnements, pour ses conseils et l'aide qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Je remercie Monsieur A. SEDDIKI, Responsable de la Division Hydrologie Isotopique, et le personnel de son service ainsi que Mademoiselle Z. TERAÏ, pour les analyses et les mesures annexes qu'ils ont bien voulu faire sur mes échantillons.

Je voudrais que mes camarades de travail, Mesdemoiselles M. BELLOULO, A. BENAMRANE, L. HAÏDER, ainsi que Monsieur M. TAHTAT et l'ensemble du personnel de nos laboratoires trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour l'aide, technique et morale, qu'ils m'ont apportée, et pour l'amicale sympathie qu'ils ont bien voulu m'accorder.

Mes remerciements vont enfin à Madame F.Z. CHOUAÏNI, Secrétaire au Centre de Développement des Techniques de Radioprotection et Sécurité, quant à la frappe de mon mémoire.

R. BOUDJELLA.

Table des Matières

		Page
Chapitre I.	INTRODUCTION.	1
Chapitre II.	THEORIE DE LA SCINTILLATION LIQUIDE.	
11.1.	<i>Le tritium : propriétés physiques et chimiques</i>	3
11.2.	<i>Les principes généraux de spectrométrie et comptage par scintillation liquide</i>	4
11.3.	<i>Les solvants et les solutés</i>	4
11.3.1.	<i>Le solvant</i>	4
11.3.2.	<i>Les solutés</i>	7
a)	<i>Solutés primaires</i>	7
b)	<i>Solutés secondaires</i>	8
11.4.	<i>Problèmes rencontrés en comptage par scintillation liquide et corrections nécessaires à apporter</i>	11
11.4.1.	<i>Quenching</i>	11
11.4.2.	<i>Bruit de fond</i>	11
11.4.2.1.	<i>Photomultiplicateur</i>	11
11.4.2.2.	<i>Rayonnements cosmiques</i>	12
11.4.2.3.	<i>Phosphorescence</i>	12
11.4.2.4.	<i>Coïncidence</i>	12
11.4.2.5.	<i>Chimiluminescence</i>	13
11.5.	<i>Statistiques de comptage</i>	14
11.5.1.	<i>Définitions</i>	14
11.5.1.1.	<i>Comptage</i>	14
11.5.1.2.	<i>Erreur statistique sur une seule mesure N</i>	14
11.5.1.3.	<i>Ecart-type sur le comptage</i>	15
11.5.1.4.	<i>Taux de comptage</i>	15
11.5.1.5.	<i>Erreur statistique sur le taux de comptage net</i>	15
11.5.1.6.	<i>Rendement de l'appareil de comptage</i>	16
a)	<i>Exemple</i>	16
b)	<i>Dilutions à réaliser</i>	17
c)	<i>Incertitude sur le rendement</i>	18
d)	<i>Présentation des résultats en concentration de ^3H</i>	18

11.5.1.7.	<i>Seuil de détection.</i>	18
-----------	----------------------------	----

Chapitre III. DESCRIPTION ET CARACTERISTIQUES DES APPAREILS
ET DES SOLUTIONS CHIMIQUES

III.1.	<i>Les photomultiplicateurs</i>	20
III.1.1.	<i>La photocathode</i>	21
III.1.2.	<i>Optique électronique et dynodes</i>	21
III.1.3.	<i>Le préamplificateur</i>	22
III.2.	<i>Electronique de comptage</i>	22
III.2.1.	<i>Le circuit de coïncidence</i>	23
III.2.2.	<i>Le circuit de sommation</i>	23
III.2.3.	<i>L'amplificateur</i>	24
III.2.4.	<i>L'analyseur d'amplitude et discriminateur</i>	25
III.2.5.	<i>Les échelles de comptage</i>	25
III.2.6.	<i>Sortie des résultats</i>	26
III.3.	<i>Les solutions chimiques</i>	26
III.3.1.	<i>Solutés primaires et secondaires</i>	26
III.3.2.	<i>Standards et sources</i>	27
III.3.2.1.	<i>Standards non affaiblis</i>	27
III.3.2.2.	<i>Standards affaiblis</i>	27
III.3.3.	<i>Flacons pour le comptage en scintillation liquide.</i>	28

Chapitre IV. PREPARATION CHIMIQUES DES ECHANTILLONS A
COMPTER

IV.1.	<i>Analyse des eaux : la méthodologie</i>	30
IV.1.1.1.	<i>Distillation</i>	30
IV.1.2.	<i>Electrolyse - Enrichissement électrolytique</i>	30
IV.1.3.	<i>Le seuil de mesure après l'électrolyse</i>	34

Chapitre V. REGLAGE DU SYSTEME DE COMPTAGE

V.1.	<i>Réglage de l'électronique - Choix des divers paramètres</i>	37
V.1.1.	<i>Réglage manuel des canaux du compteur pour les mesures en simple marquage.</i>	37
V.1.2.	<i>Spectres de distribution des impulsions électriques de comptage d'échantillons non quenchés et quenchés</i>	40

U.1.3.	<i>Les méthodes de correction de quenching</i>	42
U.&.3.1.	<i>Correction de quenching par la méthode "rapport des canaux".</i>	43
U.1.3.2.	<i>Correction de quenching par la méthode "standardisation externe".</i>	44

Chapitre VI RESULTATS EXPERIMENTAUX

U1.1.	<i>Présentation des résultats partiels</i>	49
U1.1.1.	<i>Méthode de calcul du bruit de fond de l'appareil</i>	49
U1.1.1.1	<i>Calcul de la déviation standard du bruit de fond de l'appareil</i>	49
U1.1.2.	<i>Eaux superficielles</i>	50
U1.1.2.1.	<i>Région de Béni-Slimane (Médéa)</i>	50
U1.1.2.2.	<i>Résultats</i>	52
U1.1.3.	<i>Eaux de nappes souterraines</i>	54
U1.1.3.1.	<i>Région de Béni-Slimane (Médéa)</i>	54
U1.1.3.2.	<i>Région du Sahara : Sud - Centre, Sud - Ouest</i>	54
U1.1.3.3.	<i>Résultats</i>	56
U1.1.4.	<i>Eaux de pluie</i>	58
U1.1.4.1.	<i>Région d'Alger</i>	58
U1.1.4.2.	<i>Résultats</i>	60
U1.1.5.	<i>Eaux de mer</i>	62
U1.1.5.1.	<i>Région d'Alger</i>	62
U1.1.5.2.	<i>Résultats</i>	64
U1.1.6.	<i>Eaux potables</i>	62
U1.1.6.1.	<i>Région d'Alger</i>	62
U1.1.6.2.	<i>Résultats</i>	64

Chapitre VII.	DISCUSSION DES RESULTATS	66
---------------	--------------------------	----

Chapitre VIII.	CONCLUSIONS	71
----------------	-------------	----

Table des tableaux

Tableau des figures

Annexe

Bibliographie

CHAPITRE I.

I. INTRODUCTION.

Le tritium est un élément radioactif de la famille isotopique de l'hydrogène. Sa présence dans l'environnement est due surtout à l'action des rayons cosmiques dans l'atmosphère et à un degré moindre aux retombées radioactives suite à des essais nucléaires. Les rejets d'effluents liquides provenant de centrales nucléaires, pour les pays qui en sont dotés, peuvent contribuer à l'élévation des niveaux de tritium dans les eaux.

L'intérêt des mesures de concentrations de tritium dans les eaux pluviales, marines, souterraines et potables est multiple. Pour notre part, nous citerons seulement deux domaines où ces mesures sont relativement importantes dans les diverses études sur l'environnement et les ressources naturelles : la protection contre les rayonnements (radioprotection) et l'hydrologie.

En radioprotection, pour des populations exposées régulièrement, les Concentrations Maximales Admissibles (C.M.A) sont de l'ordre de 3 nCi/c.c en général et 1 nCi/c.c pour des cas particuliers. Les résultats expérimentaux obtenus sur des échantillons d'eaux prélevés en différents points en Algérie nous permettront de comparer les concentrations mesurées aux C.M.A.

En hydrologie, l'analyse de l'évolution des concentrations du tritium dans les eaux souterraines permet d'étudier les recharges des nappes aquifères ainsi que les vitesses d'écoulement des eaux.

La méthode utilisée pour les mesures des niveaux de tritium est celle du comptage par scintillation liquide pour les émetteurs Béta mous. Cette méthode est la plus efficace parmi les techniques connues pour les mesures de tritium dans un milieu liquide. Le spectromètre utilisé pour nos travaux permet le comptage automatique de plusieurs échantillons successivement.

L'objectif premier de ce travail est de déterminer les concentrations en tritium dans les eaux souterraines, pluviales, marines et potables pour un certain nombre de sites en Algérie et de comparer ces concentrations d'une part aux Concentrations Maximales Admissibles et d'autre part entre-elles. Ce travail constitue l'un des premiers jalons d'une série d'études longues et laborieuses en radioprotection et en hydrologie isotopique que le Commissariat aux Energies Nouvelles se propose d'entreprendre en collaboration avec certains organismes nationaux concernés.

Ce mémoire de fin d'études a été divisé en huit (08) chapitres. Outre l'introduction qui constitue le premier chapitre, le chapitre II traite des aspects théoriques de la scintillation liquide, le chapitre III décrit les caractéristiques des appareils et des solutions utilisés, le chapitre IV donne un aperçu sur les méthodes expérimentales employées, le chapitre V spécifie le réglage du système de comptage, le chapitre VI présente les résultats expérimentaux, lesquels sont discutés au chapitre VIII. Finalement, une série de conclusions sont présentées au chapitre VIII.

CHAPITRE II

II. THEORIE DE LA SCINTILLATION LIQUIDE

- 11.1. *Le tritium : Propriétés physiques et chimiques.*
- 11.2. *Les principes généraux de spectrométrie et comptage par scintillation liquide.*
- 11.3. *Les solvants et les solutés;*
- 11.4. *Problèmes rencontrés en spectrométrie par scintillation liquide et correction nécessaire à apporter.*
- 11.5. *Les statistiques de comptage.*

II.1. Le tritium : propriétés physiques et chimiques :

Isotope radioactif de masse 3 de l'hydrogène, ayant les mêmes propriétés chimiques que l'hydrogène, le tritium peut être sous deux formes chimiques différentes :

1. Tritium gaz : pratiquement inerte, ne donne d'une très faible contamination.
2. Eau tritiée : très adsorbable, se comporte comme l'eau, à l'exception d'un faible pourcentage du tritium qui se fixe sur les protéines.

Le tritium se désintègre par émission β^- (voir figure II.1) avec une période de 12,43 ans donnant de l'hélium 3 :

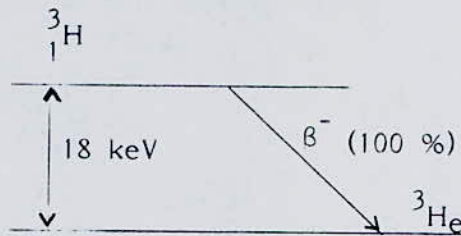


Fig II.1. Schéma de désintégration du tritium.

Comme le montre son spectre de désintégration (voir figure II.2) il s'agit d'un émetteur de rayons β très mous ; leur énergie maximale est de l'ordre de 18,6 keV et leur énergie moyenne est : $\bar{E} = \frac{1}{3} E_{\max}$; $\bar{E} = 6,2 \text{ KeV}$



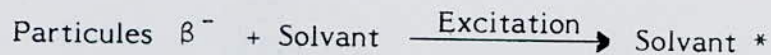
Sa période biologique est de dix (10) jours.

Un atome de tritium peut remplacer un atome d'hydrogène pour donner une molécule HTO ; celle-ci se comporte chimiquement comme une molécule : H_2O .

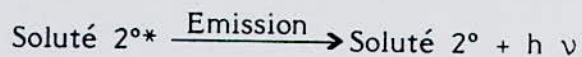
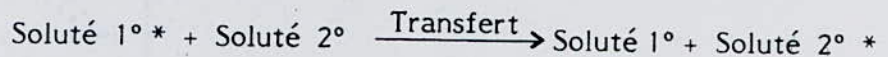
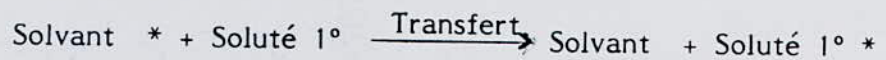
II.2. Les principes généraux de spectrométrie et comptage par scintillation liquide :

La détection d'émetteurs Béta mous se fait en général par scintillation liquide, selon le modèle suivant :

1. Absorption des radiations Béta dans un solvant (toluène, xylène, dioxane, ...) résultant en excitations et ionisations :



2. Conversion de l'énergie dissipée dans le solvant en lumière (phénomène de luminescence) dans le soluté :



3. Transit des photons de la lumière produite dans le soluté vers la photocathode du tube photomultiplicateur.

4. Absorption des photons par la photocathode et émission d'électrons.

5. Multiplication électronique à l'intérieur du tube photomultiplicateur.

6. Les impulsions engendrées par le tube photomultiplicateur et l'analyse des impulsions.

II.3. Les solvants et les solutés :

II.3.1. Le solvant : Le solvant joue un rôle essentiel dans le transfert d'énergie d'un émetteur radioactif aux molécules du scintillateur.

Une particule Béta est émise par le tritium. La particule excite les molécules du solvant qui se trouvent le long de son parcours. Cette énergie est transférée d'une molécule à l'autre, diffusant ainsi l'énergie d'origine de la particule. Finalement, la molécule ou les molécules du solvant transfèrent leur énergie à une molécule adjacente du scintillateur primaire. La molécule du scintillateur devient excitée. Elle émet son énergie d'excitation sous forme de photons de lumière d'une longueur d'onde caractéristique. Quand les photons de lumière parviennent à une molécule du scintillateur secondaire, ils sont absorbés et réémis à une grande longueur d'onde. Une petite quantité d'énergie est perdue à chaque étape du procédé. La diffusion et la perte d'énergie ainsi que les effets de la statistique des quanta réduisent la résolution globale à la fois pendant le procédé de scintillation et la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique dans le photomultiplicateur lui-même.

On trouve les bons solvants dans la catégorie des aromates d'hydrocarbure. Beaucoup de solvants ont été testés, mais peu ont été retenus pour l'usage courant.

Un bon solvant doit posséder les caractéristiques suivantes :

- . Il doit dissoudre les scintillateurs en quantité suffisante ;
- . Il doit être un bon facteur de transfert d'énergie ;
- . Il doit dissoudre la substance radioactive ;
- . Il doit geler à une température basse inférieure à $+ 4^{\circ} \text{C}$;
- . Son emploi ne devrait pas poser de problèmes de sécurité, c'est-à-dire, qu'il doit être relativement non toxique et avoir un point de combustion relativement élevé.

Quelques exemples de solvants avec leurs caractéristiques sont donnés ci-dessous :

Solvants	Caractéristiques	Rendement en amplitude relative
TOLUENE	<ul style="list-style-type: none">. Point de congélation bas (- 70° C). Point de combustion relativement élevé.. Faible toxicité.. Prix modéré - facile à obtenir.. Bon solvant, stockage facile.	1,00
DIOXANE	<ul style="list-style-type: none">. Point de congélation élevé : (+ 11°C).. Solvant relativement inefficace, sauf pour les solutions aqueuses.. Inflammable.. Prix élevé en qualité de haute pureté.. Tendance à former des peroxydes dans le temps.. Doit être très pur.. Chimiquement instable.	0,40
NAPHTALENE (Solide)	<ul style="list-style-type: none">. Employée pour augmenter l'amplitude relative du dioxane.. Améliore la transmission d'énergie du solvant scintillateur.	51,00

Parmi ces exemples, le toluène est de loin le plus approprié. Initialement, il fut adopté pour le comptage des acides gras radioactifs et parcequ'il dissout les divers composés organiques. Le toluène est également utilisé pour le comptage des échantillons sur papier ou filtres et dans les émulsions pour le comptage des solutions aqueuses.

Le dioxane est facile à obtenir sous une forme très pure et à des prix raisonnables.

Si ce produit n'était pas utilisé sous la forme la plus pure, il est probable que les résultats de comptage varieraient de lot en lot. Il ne doit pas être stocké pendant longtemps car des peroxydes se formeraient. Bien qu'il ne faille pas déconseiller son utilisation, il est probable que certains remplaceront par des émulsions "toluène-détergent".

II.3.2. Les solutés :

Les solutés sont des substances de nature aromatique dont le rôle est de capter l'énergie fluorescente fournie par les molécules de solvant ; ce sont les molécules de soluté qui produiront les photons qui seront détectés par des photomultiplicateurs. Les liquides scintillants renferment un ou deux solutés. Dans ce dernier cas, l'un des solutés est appelé soluté primaire, l'autre soluté secondaire. L'énergie de fluorescence du solvant est transférée au soluté primaire puis au soluté secondaire. Pour que ces transferts d'énergie aient lieu, il est nécessaire que les spectres de fluorescence et d'absorption de ces composés se chevauchent au moins partiellement.

Le spectre de fluorescence du soluté secondaire se situe dans la région de sensibilité de la photocathode (4 000 à 5 000 Å).

a) Solutés primaires :

- P P O : 2,5 diphényl-oxalole. C'est le scintillateur le plus fréquemment utilisé. Il est employé à la concentration de 4 g/l et en général avec, comme scintillateur secondaire, le POPOP ou diméthy-POPOP

- NAPHTALENE : Le naphthalène est utilisé dans certains mélanges scintillants à base de PPO et de POPOP (mélange de BRAY, BRUN et KINARD).

L'addition de naphthalène a pour effet d'augmenter l'efficacité de comptage des échantillons quenchés.

- P - TERPHENYL : (Diphényl - 1,4 - benzène). le P - Terphényl a été l'un des premiers scintillateurs primaires utilisés.

Il a été abandonné à cause de sa solubilité insuffisante dans le toluène à froid. Par contre, il peut-être employé pour les mesures faites avec des compteurs qui fonctionnent à la température ambiante.

Le P - Terphényl est utilisé à raison de 8 g/l de toluène avec du POPOP ou diméthyl - POPOP comme scintillateur secondaire.

b) Solutés secondaires :

- P O P O P : 1,4 bis/2 (5 - phényloxazol) - benzène. C'est le scintillateur secondaire qui a été le plus utilisé, mais il est maintenant remplacé par le diméthyl - POPOP.

-DI-METHY-POPOP: 1/4 bis/2 (4 méthyl -5- phényloxazolyl) - benzène. Ce scintillateur présente des performances d'être environ trois fois plus soluble dans le toluène.
Dans les mélanges scintillants, il est utilisé à la concentration de 0,1 g/l et est associé en général au PPO.

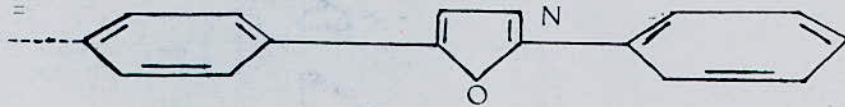
- P B B O : 2 - (4 - biphénytyl -6- phényl - benzoxazole) nouvellement diffusé (CIBA). Il est utilisé comme soluté secondaire en association avec le butyl - PBD.

Solvant =
Toluène



1 litre

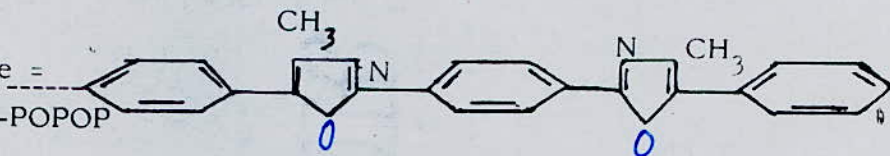
Primaire
PPO =



4 à 6 g

Solutés =

Secondaire =
di-méthyl-POPOP



0,1 g

Exemple de composition de cocktails :

- Toluène	1 litre] le mélange scintillant le plus classique.
- P O P.....	4 g.	
- P O P O P.....	100 mg.	

- Xylène.....	1 litre] Mélange scintillant le plus performant en rendement mais aussi le plus fragile.
- Buthyl-PBD.....	6g.	

II.4. Problèmes rencontrés en comptage par scintillation liquide et corrections nécessaires à apporter :

Les sources d'erreurs en comptage par scintillation liquide sont nombreuses et nécessitent des corrections appropriées en vue d'obtenir des résultats acceptables.

Les sources d'erreur à considérer sont liées aux divers types de quenching, au bruit de fond dû aux photomultiplicateurs, aux rayonnements cosmiques (effet Cerenkov), à la phosphorescence, aux coïncidences parasites, et enfin à la chimiluminescence.

II.4.1. Quenching :

Le présence de molécules autres que le corps scintillant (eau notamment), dans le détecteur, entraînent un affaiblissement lumineux. En effet, elles absorbent l'énergie d'excitation des substances scintillantes qu'elles restituent sous forme de chaleur et non sous forme de photons.

Un autre type de quenching peut être dû à des substances colorées qui absorbent une partie des photons.

Il en résulte un affaiblissement lumineux et un déplacement spectral proportionnel au degré de quenching du milieu.

Pour remédier à ce quenching, ou tout au moins pour le rendre identique pour tous les échantillons, ceux-ci seront systématiquement distillés avant le comptage.

II. 4. 2. Bruit de fond :

II.4.2.1. Photomultiplicateur : PM

Les photocathodes, très sensibles, émettent non seulement sous l'effet de la lumière provenant du détecteur, mais aussi sous l'effet de la chaleur. Le photomultiplicateur émet le même nombre d'électrons qu'il soit seul ou en présence de ^3H .

Le système par coïncidence permet de limiter les impulsions dues au bruit de fond.

De plus, détecteur et photomultiplicateur sont installés dans une enceinte réfrigérée afin de diminuer l'agitation thermique à l'origine de l'émission parasite d'électrons.

II.4.2.2. Rayonnements cosmiques:

Les rayonnements cosmiques peuvent également produire des photons suite à leur interaction avec la solution scintillante. Le blindage du système peut néanmoins réduire la concentration des rayons cosmiques.

II.4.2.3. Phosphorescence :

C'est un autre mode de désexcitation des molécules. Elle produit une lumière faible mais longue à s'atténuer et qui vient donc "parasiter" la fluorescence. Ainsi, le verre excité par la lumière du jour émet ensuite par phosphorescence.

C'est pourquoi les échantillons seront introduits dans le compteur le soir, laissés la nuit pour que la phosphorescence devienne négligeable, le comptage ne débutant que le lendemain matin.

II.4.2.4. Coïncidence :

Le système de coïncidence permet le comptage des impulsions lumineuses qui sont vues en même temps par les deux (02) PM.

Les impulsions parasites comptées par un seul PM, sont ainsi éliminées. Les coïncidences fortuites sont diminuées dans une proportion d'autant plus grande que le temps de résolution du système pour les coïncidences réelles est court.

II.4.2.5. Chimiluminescence :

La chimiluminescence est une réaction au cours de laquelle l'énergie produite par cette réaction apparaît sous forme de lumière et ce à l'opposé des réactions habituelles qui se traduisent par un effet thermique.

En scintillation liquide, il s'agit donc de molécules capables de provoquer une émission de photons bien que n'étant pas radioactives. Il s'agit donc de réactions parasites dont la lumière produite vient s'ajouter à celles issue de la radioactivité.

La chimiluminescence apporte donc des photons parasites qui viennent s'ajouter aux photons de radioactivité. Les tubes PM ne différencient pas les deux types de photons et les enregistrent globalement. En présence de chimiluminescence, les mesures d'activité peuvent être surestimées.

Le meilleur moyen de ne pas avoir des résultats faussés par la chimiluminescence, est de l'éliminer totalement. Ceci est malheureusement difficile à réaliser.

Il existe malgré tout certaines possibilités pour atténuer fortement la chimiluminescence ou quelquefois pour la supprimer :

- a. Attendre que la réaction de chimiluminescence soit terminée. Mais le temps que l'utilisateur possède pour effectuer ses mesures ne le permet généralement pas.
- b. Ramener le pH du milieu qui est, basique en milieu légèrement acide (pH = 6) ; mais l'échantillon doit pouvoir le supporter chimiquement.
- c. Purger la solution avec un gaz inerte (N_2).
- d. Rajouter dans le milieu, de l'acide ascorbique qui est un inhibiteur de chimiluminescence, mais cela ajoute un agent affaiblissant chimique supplémentaire et l'échantillon doit pouvoir l'intégrer sans problème.

Le système de comptage utilisé offre trois (03) avantages à l'utilisateur :

1. Il détecte la chimiluminescence.
2. Il indique à l'utilisateur si une correction est possible.
3. Dans le cas d'une réponse positive, il mesure le chimi-luminescence.

II. 5. Statistiques de comptage :

II.5.1. Définitions :

II.5.1.1. Comptage :

Somme des impulsions enregistrées pendant un temps donné lors d'une mesure de radioactivité.

II.5.1.2. Erreur statistique sur une seule mesure N :

On utilise les propriétés de la distribution de Gauss pour déterminer quelle valeur ΔN l'on doit prendre en plus et en moins de la valeur N obtenue pour qu'il y ait probabilité, par exemple de 68 %, de trouver \bar{N} inclus entre $N + \sigma_N$ et $N - \sigma_N$.

σ_N est égal à \sqrt{N} et s'appelle écart - type.

Si l'on désire avoir une probabilité de :

68 % l'écart type doit être σ_N soit \sqrt{N}

96 % l'écart-type doit être $2 \sigma_N$ soit $2 \sqrt{N}$

99 % l'écart-type doit être $3 \sigma_N$ soit $3 \sqrt{N}$.

II.5.1.3. Ecart-type sur le comptage :

Si l'on utilise, comme c'est souvent le cas, la probabilité de 68 % d'avoir un résultat de comptage N , celui-ci s'écrit :

$$(1) \quad N = \bar{N} \pm \sigma_N \quad \text{avec : } \sigma_N = (\bar{N})^{1/2}$$

II.5.1.4. Taux de comptage :

Afin de faciliter les comparaisons entre les comptages on utilise le taux de comptage r :

$$(2) \quad r = \frac{N}{t}$$

en impulsions par minutes (IPM)

En combinant (1) et (2) il vient : écart-type sur le taux de comptage .

$$\sigma_n = \frac{\sigma_N}{t} = \frac{(\bar{N})^{1/2}}{t} = \frac{(rt)^{1/2}}{t} = \left(\frac{r}{t}\right)^{1/2}$$

$$(3) \quad \sigma_n = \left(\frac{r}{t}\right)^{1/2}$$

II.5.1.5. Erreur statistique sur le taux de comptage net :

Taux de comptage brut : Activité propre de la source radioactive (r_s) augmentée du bruit de fond de l'appareil de mesure (r_b).

$$(4) \quad r_c = r_s + r_b$$

On recherche évidemment :

$$(5) \quad r_s = r_e - r_b$$

L'écart-type du taux de comptage net est égal à :

$$\sigma_{r_s} = (\sigma_{r_e}^2 + \sigma_{r_b}^2)^{1/2}$$

et d'après (3) :

$$(6) \quad \sigma_{r_s} = \left(\frac{r_e}{t_e} + \frac{r_b}{t_b} \right)^{1/2}$$

II.5.1.6. Rendement de l'appareil de comptage :

L'étalonnage de l'appareil de comptage est nécessaire pour exprimer les résultats de comptage en concentrations de ^3H .

$$\text{Rendement de comptage : } R = \frac{\text{CPM}}{\text{DPM}} \quad (7)$$

la mise en comptage d'un nombre connu de d.p.m étant nécessaire, on emploie une solution d'eau tritiée étalon fournie par le L.M.R.I (Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants).

a - Exemple :

Une source d'eau tritiée achetée au L.M.R.I est accompagnée du certificat d'étalonnage. Ce certificat indique :

5 ml d'eau tritiée ; densité 0,998 à 20° C ; Activité 0,641 Ci/g le 06. 10. 80 ; incertitude 2 %.

Il est nécessaire d'opérer une dilution de cette source afin d'obtenir un comptage d'environ 10^4 c.p.m en 100 minutes.

$$\text{Activité par ml} : 0,998 \times 0,641 \times 2,22 \cdot 10^6 = 2,22 \cdot 10^6 \text{ d.p.m}$$

b. - Dilutions à réaliser :

- Solution A :

5 ml d'eau tritiée dans 1000ml d'eau distillée, soit : $7,10 \cdot 10^3$ dpm/ml

- Solution B :

100 ml d'eau tritiée dans 500 ml d'eau distillée soit : $1,42 \cdot 10^3$ dpm/ml

- Solution C :

50 ml d'eau tritiée dans 500 ml d'eau distillée soit : 142,02 dpm/ml

Le comptage de 10 ml de la solution C donne : 59,44 c.p.m

A la date du 06. 10. 80, le nombre de d.p.m/ml est de :
142,02 (solution C).

A la date d'aujourd'hui : 15. 04. 85, l'activité est de :
 $142,02 \times 0,778 = 110,49$ d.p.m/ml.

(fd = 0,778 étant le facteur de décroissance).

Le rendement de comptage sera donc :

$$R = \frac{59,44}{110,49} = 0,54$$

$$R = 0,54$$

c - Incertitude sur le rendement :

Dans les conditions de comptage ci-dessous, elle est de l'ordre de l'incertitude sur la valeur de l'activité de la source étalon, soit 2 %.
(2 à 3 % en réalité à cause du pipetage).

d - Présentation des résultats en concentrations de ^3H :

La concentration de ^3H s'exprime en Unités Tritium (U.T) ou en activité spécifique par exemple pico-curie par litre (pCi/l).

Résultat du comptage en concentration de ^3H :

Si 10 ml d'eau tritiée ont été analysés :

$$C (^3\text{H}) = \frac{\text{CPM} \times 140,8}{R \times 10} \quad \text{UT (avec } R = 0,54)$$

$$C (^3\text{H}) = \frac{\text{CPM} \times 1\,000}{R \times 10 \times 2,22} \quad \text{pCi/l (avec } R = 0,54)$$

(voir tableau de correspondance des unités en annexe).

II.5.1.7. Seuil de détection :

Le seuil de détection correspond à l'activité la plus faible qui puisse être distinguée du bruit de fond de l'appareil.

D'après les relations (4) et (6) :

$$\sigma_{r_s} = \left(\frac{r_s + r_b}{t_e} + \frac{r_b}{t_b} \right)^{1/2}$$

On prend $t_e = t_b$, et :

$$\sigma_{r_s} = \left(\frac{r_s + 2 r_b}{t} \right)^{1/2}$$

Le seuil de détection S.D. intéresse de très faibles activités
aussi : r_s est $\ll 2 r_b$.

$$\sigma_{r_s} = \left(\frac{2 r_b}{t} \right)^{1/2}$$

On prend le seuil de détection égal à 2 ns , au dessus de la valeur du bruit de fond.

Ainsi, on a 96% de chances que l'échantillon en question contienne du ^3H avec une teneur de :

(en prenant $r_b = 12,79 \text{ cp.m}$ et $t_b = 100 \text{ mn}$).

$$SD = 2 \left(\frac{2 r_b}{t} \right)^{1/2} \times \frac{140,8}{\text{V.R.}}$$

$$SD = 2 \left(\frac{2 \times 12,79}{100} \right)^{1/2} \times \frac{140,8}{10 \times 0,54} \sim 26 \text{ UT.}$$

CHAPITRE III

III. DESCRIPTION ET CARACTERISTIQUES DES APPAREILS ET DES SOLUTIONS CHIMIQUES.

III.1. *Les photomultiplicateurs.*

III.2. *L'électronique de comptage.*

III.3. *Les solutions chimiques.*

III. DESCRIPTION ET CARACTERISTIQUES DES APPAREILS ET DES SOLUTIONS CHIMIQUES :

Nous avons vu que la scintillation liquide était la transformation d'un rayonnement en émission lumineuse.

Les photons lumineux issus des scintillations sont détectés par un système électronique constitué d'un photomultiplicateur qui délivre des impulsions électriques, les impulsions sont amplifiées, triées, analysées et comptées.

Le résultat du comptage s'affichant finalement sur une machine imprimante. Notons que les appareils capables de telles mesures s'appellent spectromètres à scintillation liquide.

Dans ce qui suit nous nous proposons d'analyser le rôle de ce dispositif électronique et de montrer le mécanisme de fonctionnement de chacun de ses sous-ensembles.

III.1. Les photomultiplicateurs :

Une impulsion électrique s'obtient en faisant passer un bref courant d'électrons dans une résistance.

Il s'agit donc de transformer les N photons nés dans le scintillateur lors de l'absorption de la particule d'énergie E en M électrons. Le photomultiplicateur a ce rôle.

Il est constitué :

- d'une photocathode ;
- d'une optique électronique ;
- d'une série de cibles à émission secondaire : les dynodes, en alliage d'antimoine et de césium, convenablement polarisées ;
- une anode couplée à un circuit ;
- un préamplificateur.

III.1.1. La photocathode :

La photocathode est une cellule photoélectrique qui reçoit d'un côté les photons lumineux et émet de l'autre des électrons. Elle doit être couplée optiquement au scintillateur de manière à éviter le plus possible les pertes de lumière.

L'ordre de grandeur d'une telle cellule est de dix (10) pour cent.

Dix (10) photons produisent en moyenne un photoélectron. Si nous détectons du tritium émetteur β^- dont l'énergie maximum est de : $E = 180.00$ eV, le scintillateur délivrera au maximum :

$$N_{\text{photons}} = \frac{180.00}{200} \text{ soit } 90 \text{ photons}$$

(Il faut en moyenne 200 eV, pour obtenir un photon) et la cellule :

$$M_{\text{électrons}} = \frac{90}{10} \text{ soit } 9 \text{ électrons pour chaque particule détectée.}$$

Ce nombre est trop élevé pour être commodément analysé. Il s'agit donc de le multiplier : c'est le rôle de l'optique électronique et des dynodes.

III.1.2. Optique électronique et dynodes :

Les électrons émis par les cellules sont dirigés électrostatiquement à l'aide de l'optique électronique d'entrée vers une première dynode. Cette dynode est polarisée positivement par rapport à la cellule afin d'attirer les particules négatives.

Le choc des électrons ainsi accélérés, arrache de la dynode des électrons secondaires;

Onze (11) à quatorze (14) dynodes sont en général utilisées, ce qui conduit à des coefficients de multiplication G pouvant atteindre 10^8 .

$$G = 10^8$$

Pour le cas du tritium, nous obtenons :

9.10^8 électrons.

Remarque :

1. Le coefficient de multiplication varie avec la tension d'accélération des électrons entre les dynodes.

2. Le photomultiplicateur doit être maintenu dans l'obscurité la plus complète pour le protéger de la lumière ambiante. Il débite cependant dans ces conditions un courant parasite : le courant d'obscurité.

Ce courant est dû, en particulier à une émission thermique de la cellule et des dynodes.

Ce courant parasite d'électrons se superpose au courant utile et vient perturber les mesures.

III.1.3. Le préamplificateur :

Ce dispositif appelé aussi adaptateur d'impédance rend possible le transfert de l'impulsion sans déformation.

Il est constitué par un tube électronique ou d'un transistor disposé de telle façon que le fonctionnement du circuit RC où naît l'impulsion ne soit pas perturbée par l'impédance des câbles de liaison, ni par celle des circuits électroniques qui lui font suite.

III. 2. Electronique de comptage :

L'électronique de comptage comprend :

- un circuit de coïncidence ;
- un circuit de sommation ;
- un amplificateur ;

- un analyseur d'amplitude et discriminateur ;
- une échelle de comptage ;
- et enfin une imprimante pour sortie des résultats.

III.2.1. Le circuit de coïncidence :

La photocathode et les dynodes du photomultiplicateur, libèrent sous l'effet de l'agitation thermique des électrons qui conduiront à la formation d'impulsions parasites.

Le nombre d'électrons délivrés par la cellule photoélectrique lors de l'absorption de la particule de basse énergie (tritium) est très faible, il est du même ordre de grandeur que celui délivré en moyenne, pendant le même temps par le photomultiplicateur en l'absence d'échantillon radioactif.

Il sera donc impossible de distinguer les impulsions vraies qui ont des amplitudes voisines.

Le rôle du circuit de coïncidence est d'éliminer au maximum les impulsions dûes au hasard.

III.2.2. Le circuit de sommation :

Lorsque le circuit de coïncidence aura enregistré un évènement comme valable, les amplitudes enregistrées par les deux photomultiplicateurs seront additionnées par le circuit de sommation.

Le rôle du circuit de sommation sera donc de faire la somme des photons enregistrés par les deux photomultiplicateurs lorsque ceux-ci auront été acceptés par le circuit de coïncidence comme appartenant à la même désintégration.

III.2.3. L'amplificateur :

Lorsqu'un évènement a été accepté par le circuit de coïncidence et par le circuit de sommation, son amplitude reste malgré tout trop faible pour pouvoir être analysée par les circuits électroniques. Le rôle de l'amplificateur sera de multiplier l'amplitude de l'impulsion de manière à ajuster l'énergie correspondante de la particule à l'échelle d'analyse de l'appareil.

Le réglage du gain de l'amplificateur sera donc un réglage fondamental en scintillation liquide.

III.2.4. L'analyseur d'amplitude et discriminateur :

Les impulsions à la sortie de l'amplificateur constituent les images de l'énergie cédée par les particules dans le milieu scintillant. A chaque particule détectée correspond une impulsion dont l'amplitude est proportionnelle à l'énergie de la particule qui lui a donné naissance.

Le spectre des amplitudes sera l'homologue du spectre des énergies, le dénombrement des impulsions permet celui des particules.

Le rôle des discriminateurs sera d'analyser les impulsions et de les sélectionner par une série de dispositifs électroniques : discriminateurs ou fenêtres de comptage.

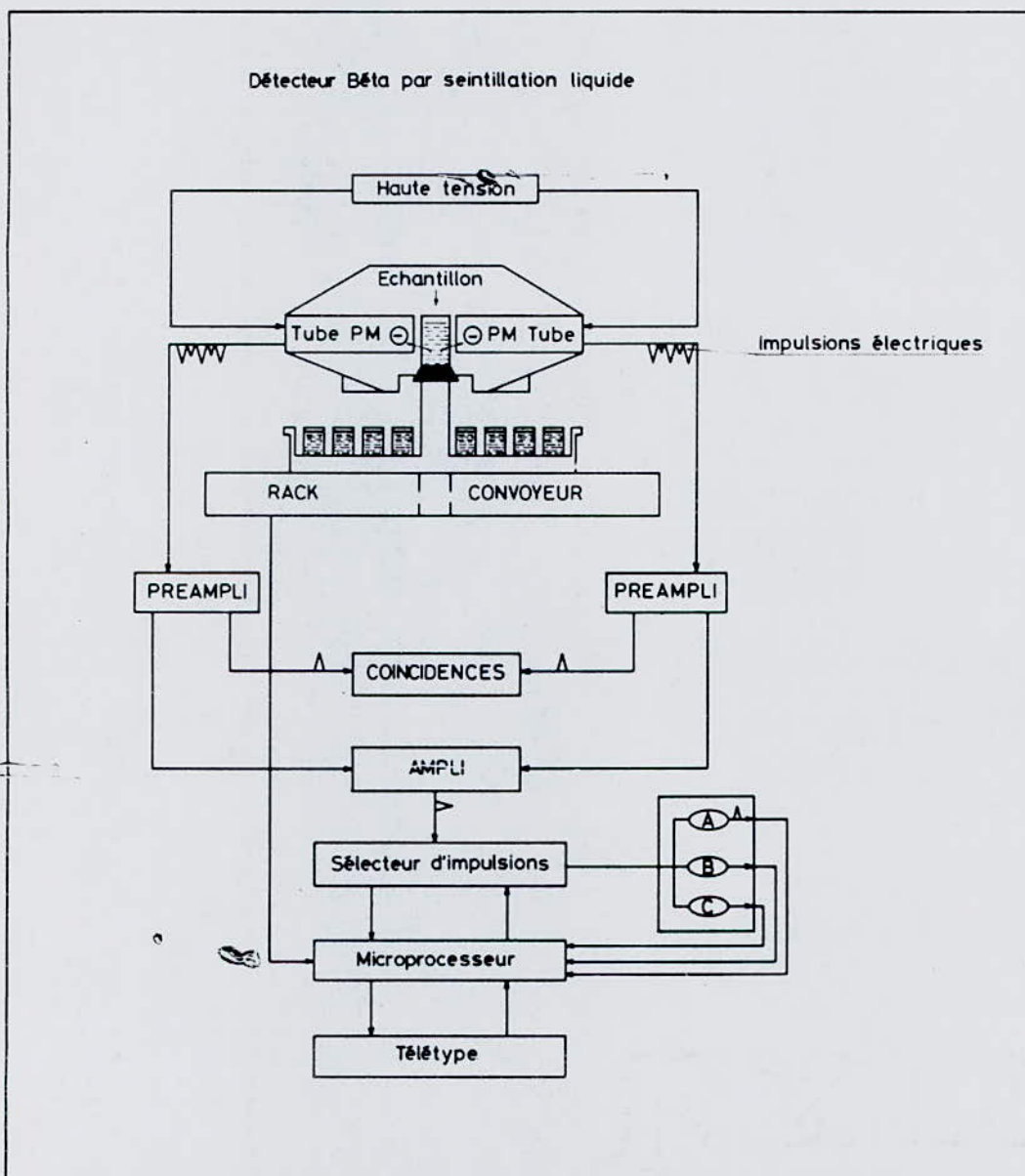
Ces discriminateurs acceptent des impulsions dont l'amplitude est comprise entre un seuil inférieur et un seuil supérieur. L'écart compris entre les deux seuils est appelé "fenêtres" ou voie de mesure.

On peut ajuster ou régler les discriminateurs pour chacun des canaux d'analyse, ce qui permet de sélectionner une énergie pour chaque isotope dans chacune des voies de mesure.

III.2.5. Les échelles de comptage :

Leur rôle est de comptabiliser les impulsions enregistrées dans chaque voie de mesure. Il s'agit de dispositifs électroniques qui comptabilisent les impulsions enregistrées dans chaque voie de mesure en fonction des réglages des discriminateurs propres à chacun des canaux d'analyse.

Détecteur Bêta par scintillation liquide



III.2.6. Sortie des résultats :

Les dispositifs électroniques comptabilisent des impulsions (ou coupes). Mais ces impulsions peuvent être ramenées en coups par minute.

III.3. Les solutions chimiques :

III.3.1. Solutés primaires et secondaires :

Solutés primaires :

Ils sont soumis à des tests rigoureux dans des spectromètres à scintillation liquide pour en assurer les meilleures performances.

PPO, qualité scintillation

2,5 - diphényloxazole

Pic de fluorescence : 365 nm

Point de fusion..... : 71 - 73° C

Poids moléculaire....: 221,25

Largement utilisé comme scintillateur primaire universel, le PPO Beckman est facilement soluble dans le toluène, le xylène et le pseudo-cumène. Pour une concentration donnée entre 4 et 6 g/l, le PPO permet d'obtenir des efficacités de comptage élevées et ne réagit pas chimiquement avec la plupart des échantillons du laboratoire.

Solutés secondaires :

Il ont des pics de fluorescence à des longueurs d'onde plus grandes que les solutés primaires. Ils sont utilisés dans des mélanges scintillants pour "déplacer" la longueur d'onde émise. On peut parfois augmenter les efficacités de comptage en utilisant un soluté secondaire conjointement avec un soluté primaire.

Diméthyl POPOP, qualité scintillation

1/4 bis/2 (4 méthyl - 5 - phényloxazoly) - benzène.

En raison de son taux de dissolution plus élevé, de sa plus grande solubilité dans des solvants scintillants, de sa meilleure stabilité acide et basique et de résistance à l'affaiblissement, le diméthyl - POPOP est recommandé comme soluté secondaire universel pour le comptage en scintillation liquide.

III.3.2. Standards et sources :

III.3.2.1. Standards non affaiblis :

Les standards non affaiblis servent à régler l'appareil de façon optimale pour le comptage en scintillation liquide et à contrôler les performances à long terme.

Trois standards sont fournis avec l'appareil :

- un standard ^{14}C ($\approx 3.10^4$ DPM) ;
- un standard ^3H ($\approx 9.10^4$ DPM)
- et un standard bruit de fond pour la détermination précise du bruit de fond.

Chaque standard, étalonné avec le matériel de référence du Bureau National des Standards Américains (N.B.S), contient du PPO et du POPOP dilués dans le toluène.

Chaque standard est scellé à la flamme sous atmosphère d'azote dans une ampoule dont la teneur en potassium est faible. La précision de l'étalonnage est de $\pm 3\%$.

III.3.2.2. Standards affaiblis :

Les standards affaiblis sont utilisés pour établir une courbe d'affaiblissement qui permet de déterminer de façon pratique les efficacités de comptage des échantillons par les techniques du nombre H, du rapport des canaux de standardisation externe ou du rapport des canaux de l'échantillon.

Chaque standard contient exactement la même quantité de radioactivité, mais il est affaibli progressivement par l'addition d'un agent d'affaiblissement.

Tous les standards contiennent du PPO et du POPOP dilués dans le toluène et sont scellés à la flamme dans une ampoule en verre dont la teneur en potassium est faible. La précision de l'étalonnage est de $\pm 3\%$

III.3.3. Flacons pour le comptage en scintillation liquide :

Guide de sélection des flacons :

Le choix du flacon pour le comptage en scintillation liquide doit faire l'objet d'une étude sérieuse. Ce choix doit tenir compte d'éléments fondamentaux tels que le type d'échantillon ou le type de cocktail.

Flacon en plastique :

Ces flacons en polyéthylène haute densité se caractérisent par des bruits de fond plus faibles et des efficacités de comptage légèrement plus élevées que les flacons en verre. Les flacons en plastiques conviennent en général aux échantillons de faible activité (moins de 5 fois le bruit de fond).

Cependant, si les échantillons sont stockés dans les flacons en plastique pendant plus d'une semaine, l'évaporation du solvant peut-être importante.

Le type de cocktail employé doit être compatible avec le type et le volume d'échantillon, et le flacon.

L'équilibre de ces éléments permet d'assurer des échantillons homogènes dont l'affaiblissement est corrigible et d'obtenir ainsi des résultats fiables tout en réduisant les coûts.

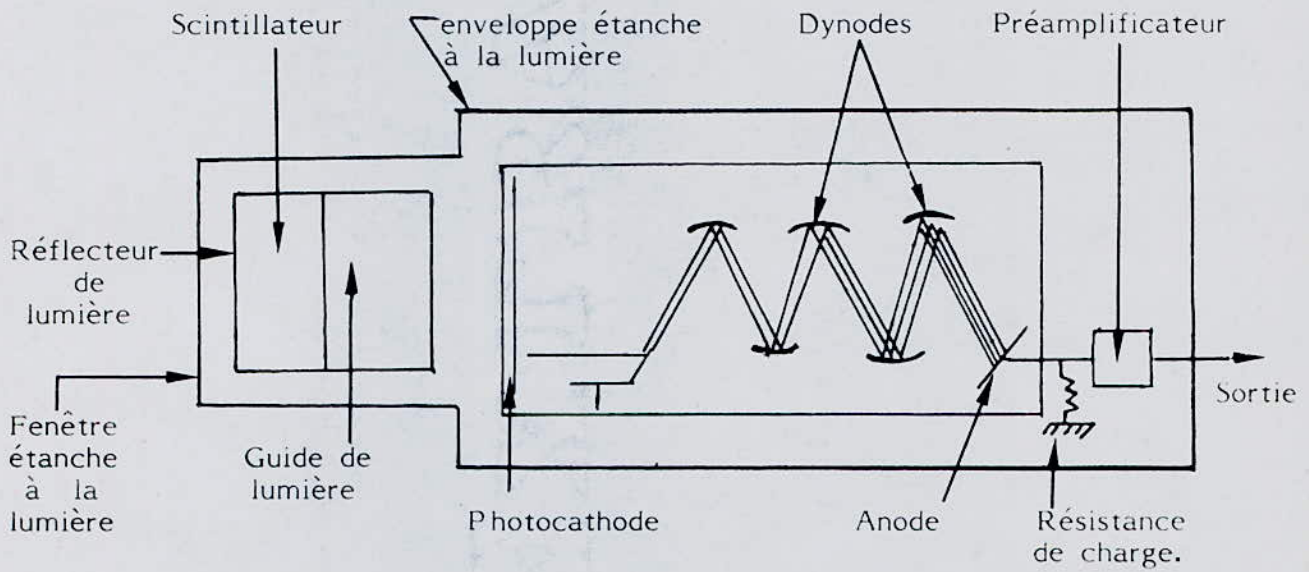


Schéma d'un photomultiplicateur

CHAPITRE IV.

IV. PREPARATION CHIMIQUE DES ECHANTILLONS
A COMPTE :

IV.1. *Analyse des eaux : la méthodologie.*

IV. PREPARATION CHIMIQUE DES ECHANTILLONS A COMPTER :

IV.1. Analyses des eaux : la méthodologie :

Il s'agit de traiter chimiquement l'échantillon avant un comptage, suivant le processus : distillation, électrolyse, distillation.

IV.1.1. Distillation :

La distillation est le passage direct d'un liquide à l'état de vapeur à température déterminée sous pression fixe, par suite, ce phénomène permet de séparer les corps volatils d'une substance fixe.

Cette opération a pour but d'isoler une substance liquide pure, quand celle-ci est mélangée à d'autres substances.

Distillation préalable à l'électrolyse :

- a. Afin d'éviter toute corrosion des électrodes et notamment de la cathode, les échantillons seront systématiquement distillés.
- b. Pour qu'il n'y ait pas de fractionnement lors de la distillation, qui se traduirait par un appauvrissement en ^3H de la fraction distillée, la distillation sera quantitative c'est-à-dire qu'elle sera effectuée totalement;

IV.1.2. Electrolyse - Enrichissement électrolytique :

1. Les teneurs en tritium qui peuvent être mesurées directement sont de l'ordre de $6,4 \cdot 10^{-2}$ (pCi/C.C.).

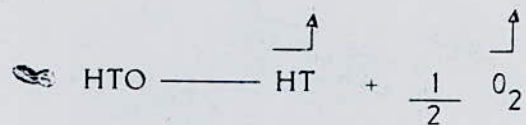
Or les eaux continentales, présentent des teneurs maintenant très souvent inférieures à ce seuil.

C'est la raison pour laquelle différentes méthodes ont été développées pour enrichir en ^3H l'eau, préalablement à son comptage.

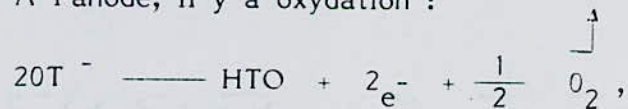
Trois voies aboutissent à un enrichissement isotopique : distillation, diffusion thermique, électrolyse. Cette dernière méthode est la plus largement employée.

2. Le tritium (^3H) et le deutérium (^2H ou D) sont bien moins volatils que l'hydrogène (^1H) lors de l'électrolyse de l'eau. Il en résulte que le tritium se concentre au fur et à mesure que l'électrolyse progresse.

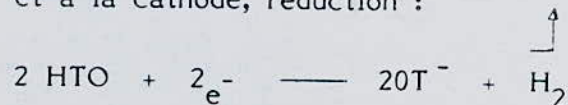
3. Dans une eau rendue alcaline, le passage du courant la décompose :



A l'anode, il y a oxydation :



et à la cathode, réduction :



4. Les facteurs influençant l'enrichissement sont la nature des électrodes, la densité de courant, la température de l'électrolyte.

4.1. La cathode (électrode interne) est un cylindre en acier doux percé de trous afin de favoriser un bon mélange de l'électrolyte. Il s'y développe un délicat revêtement bleu noir, dont l'effet catalytique permet d'excellents enrichissements ; notons que des lavages intempestifs à l'acide ou l'électrolyse d'eaux sulfatées ou chlorurées détruisent ou empoisonnent ce revêtement. L'anode (électrode externe) est en acier inoxydable afin d'éviter la corrosion.

4.2. L'équivalent électrochimique de l'hydrogène étant de : 26,592 ampères - heure (Ah) et par gramme, il faudra 2,95 Ah pour électrolyser 1 ml d'eau :

$$26,592 - \frac{2}{18} = 2,95 \text{ Ah}$$

Pour passer de 250 à 15 ml la quantité de courant nécessaire sera de :

$$(250 - 15).2,95 \approx 700 \text{ Ah.}$$

Comme le fractionnement isotopique est inversement proportionnel à la température, on a intérêt à opérer avec des densités de courant faibles. On évite de plus les pertes par entraînement et évaporation. Nos électrodes de 250 ml développent une surface de 1 160 cm² et avec un courant de 10 A, la densité n'est que de 9 mA/cm².

Le temps d'électrolyse est alors de 70 heures soit trois (03) jours avec une tension de 3 volts par électrode et un courant de 10 ampères la puissance consommée est de 30 watts par électrode.

4.3. D'autre part, la température est maintenue la plus basse possible, en opérant dans un enceinte réfrigérée. Du fait de la difficulté de la dissipation de la chaleur, la température finale de l'électrode est de l'ordre de 15 à 20° C alors que dans l'enceinte elle reste à (- 4° C).

5. Procédure pour l'électrolyse :

5.1. Distillation systématique de tous les échantillons d'eau.

5.2. On ajoute Na_2O_2 (péroxyde de sodium) à raison de 10 g/l d'eau (valeur max), ce qui entraîne une concentration en Na OH de 1 %.

5.3. On installe les électrodes en série et les barboteurs (voir Fig. 5.3.) avec l'antigel qui régularisent le flux de gaz tonnant ($\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$) et indiquent la bonne marche de l'électrolyse: absence d'entraînement d'eau qui reste piégée.

5.4. On ferme le circuit et on monte très lentement à 10 ampères. La qualité de l'enrichissement dépend de la patience que l'on apporte à cette opération.

5.5. A mi-parcours on peut contrôler la réduction de volume. Sachant qu'il faut 2,95 Ah pour électrolyser 1 ml d'eau, donc avec un courant de 10 A, il s'électrolyse :

$$\frac{10}{2,95} = 3,4 \text{ ml/h.}$$

5.6. On arrête lorsqu'il reste environ 15 ml. On mesure soigneusement les volumes obtenus;

5.7. On distille les électrolysats, car ils contiennent maintenant environ 15 % de Na OH.

5.8. On procède au nettoyage des électrons = lavage, rinçage à l'eau distillée et séchage à l'étuve.

5.9. S'il existe des risques de contamination, on enrichit une eau morte qui servira de témoin d'une éventuelle contamination.

IV.1.3. Le seuil de mesure après l'électrolyse :

1. On sait que le seuil de détection d'un comptage direct est de l'ordre de : $4,8 \cdot 10^{-2}$ (PCi/C.C).

Après un enrichissement de l'ordre de 15 à 20, le seuil descend à : $1,19 \cdot 10^{-3}$ (PCi/C.C).

Seuil de détection avant l'électrolyse : $4,8 \cdot 10^{-2}$ (PCi/C.C).

Seuil de détection après électrolyse de
250 ml..... : $3,19 \cdot 10^{-3}$ (PCi/C.C)

2. Pour certains problèmes d'hydrogéologie (nappes profondes) il est intéressant d'atteindre $3,19 \cdot 10^{-3}$ (PCi/C.C).

On peut alors, en réalisant, à partir de 1 litre d'eau, un enrichissement de 40, abaisser le seuil de détection à environ : $1,6 \cdot 10^{-3}$ (PCi/C.C).
On atteint là le maximum de performances des appareils de scintillation liquide après enrichissement électrolytique :

- Seuil de mesure après électrolyse de 1000 ml - $1,6 \cdot 10^{-3}$ (PCi/C.C)

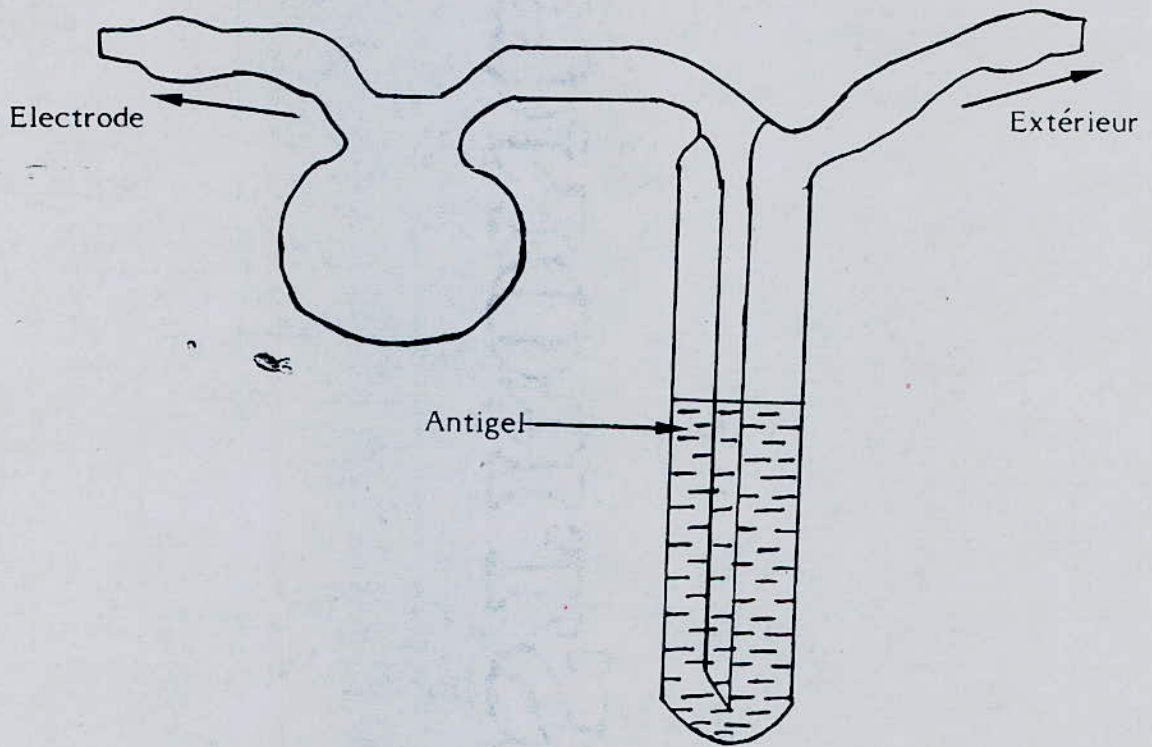
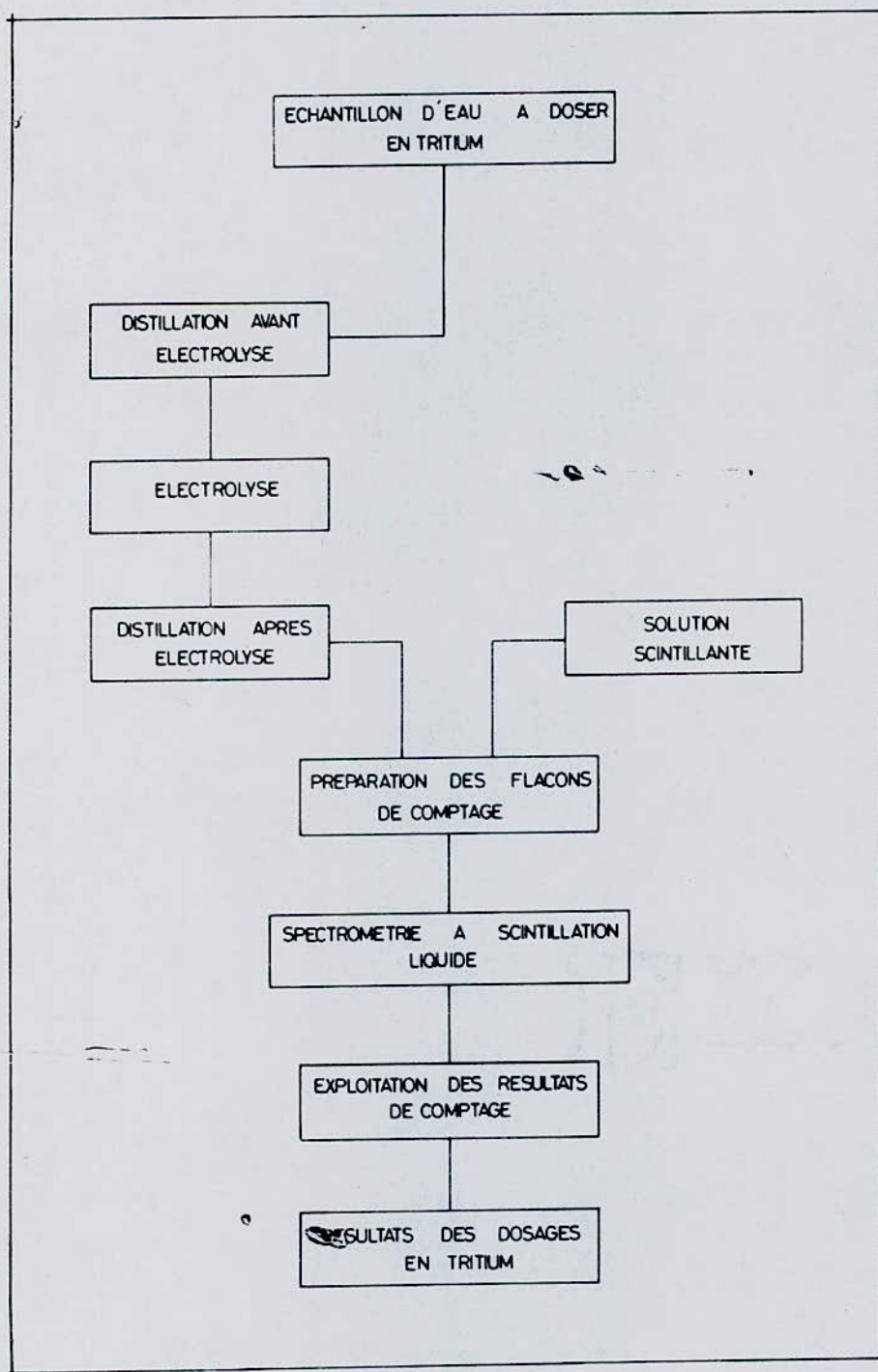


Fig. 5.3. : Plan d'un barboteur en verre placé à la sortie de la cellule à électrolyse.



CHAPITRE V.

V. REGLAGE DU SYSTEME DE COMPTAGE.

V.1. Réglage de l'électronique - Choix des divers paramètres.

V.1.1. Réglage des canaux du compteur pour les mesures en simple marquage.

V.1.2. Spectres de distribution des impulsions électriques de comptage d'échantillons non quenchés et quenchés.

V.1.3. Les méthodes de correction de quenching.

V.1.3.1. Correction de quenching par la méthode "rapport des canaux".

V.1.3.2. Correction de quenching par la méthode de "standardisation externe".

V.1. Réglage de l'électronique - Choix des divers paramètres :

V.1.1. Réglage manuel des canaux du compteur pour les mesures en simple marquage :

a) But :

Effectuer pour un compteur à scintillation liquide les réglages nécessaires pour mesurer, dans des conditions optimales, la radioactivité contenant un radioisotope (ici le tritium).

b) Principes :

Compteurs à amplification logarithmique :

(appareil Beckman)

Les compteurs de ce type ne comportent qu'un seul amplificateur qui est commun à tous les canaux de mesure. La valeur du gain de cet amplificateur est en principe réglée une fois pour toutes.

Le réglage consiste à établir un canal de mesure qui fournit un comptage maximum pour un mouvement propre (bruit de fond). Voir figure V.1.

Après avoir établi les réglages, on détermine l'efficacité de comptage E :

$$E = \frac{\text{radioactivité (IPM)} - \text{mouvement propre (IPM)}}{\text{radioactivité réelle (DPM)}}$$

c) Matériel :

Echantillons standards non quenchés de tritium.

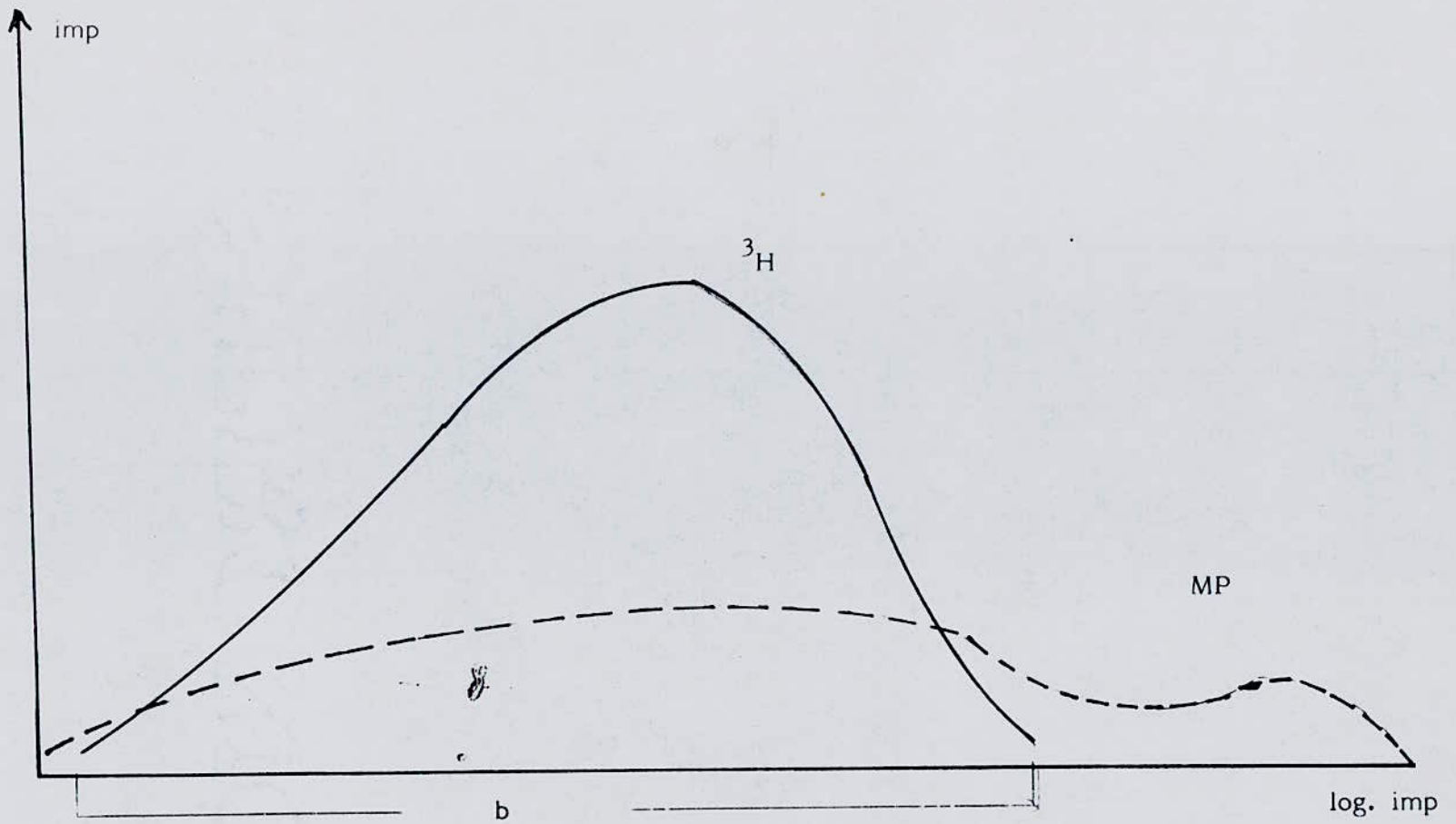


Figure V.1.

M.P. : Mouvement Propre.

d) Méthode expérimentale :

Compteurs à amplitude logarithmique :

Le principe de réglage consiste à positionner et à ouvrir le canal de mesure de telle façon que toutes les impulsions de mesure passent par le canal, tout en éliminant le maximum de mouvement propre.

1. Placer en comptage un échantillon non quenché.
2. Rechercher le seuil inférieur et supérieur.

Le réglage à effectuer en vue du comptage d'un radioisotope va consister à positionner une fenêtre de mesure dans laquelle tout le spectre du radioisotope sera inclus. Plus l'énergie du rayonnement β^- émis par le radioisotope sera élevée plus la largeur du canal (ou fenêtre) de mesure devra être grande.

Pour régler le canal, un échantillon renfermant le radioisotope est placé en position de mesure dans le compteur. En positionnant le seuil inférieur à la valeur minimale et le seuil supérieur à la valeur maximale, on obtient un canal de mesure ouvert à la largeur maximum.

Réglage du seuil supérieur :

Le seuil inférieur est remonté progressivement, le comptage diminue et devient presque nul lorsque le niveau du seuil inférieur atteint la partie supérieure du spectre. Cette valeur correspond à celle pour laquelle le seuil supérieur du canal devra être réglé.

Réglage du seuil inférieur :

Inversement, le seuil inférieur étant placé au minimum en abaissant progressivement le seuil supérieur, on détermine la position de la partie inférieure du spectre soit le seuil inférieur.

V.1.2. Spectres de distribution des impulsions électriques de comptage d'échantillons non quenchés et quenchés :

a) But :

Etablir les spectres de distribution des impulsions électriques provenant de la détection des rayonnements β^- émis par du tritium. Ces spectres seront établis en l'absence ou non, dans le système scintillant, d'une substance provoquant un affaiblissement lumineux (quenching).

On observera que le quenching entraîne une :

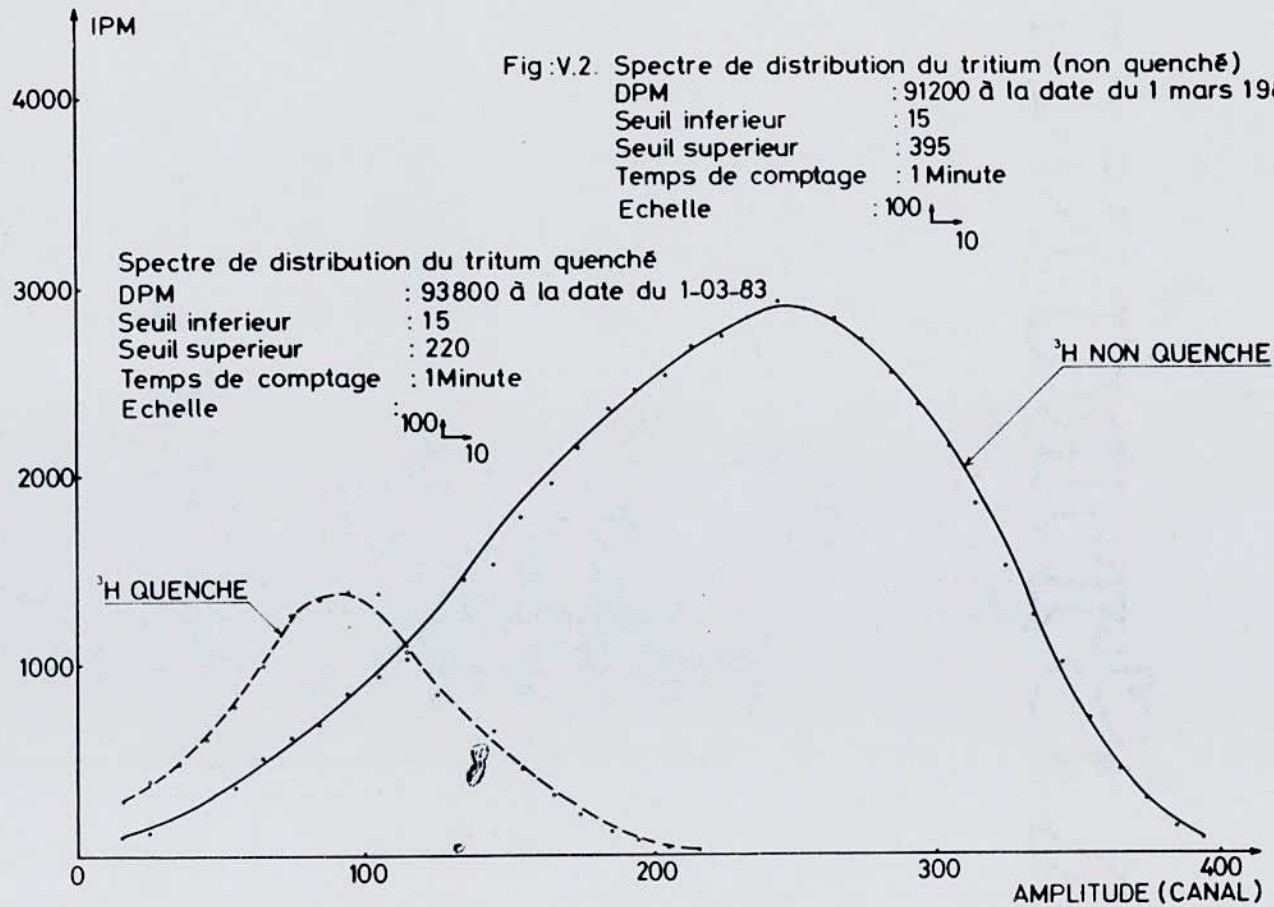
- diminution globale du comptage ;
- modification du spectre de distribution des impulsions électriques de comptage : la surface du spectre provenant d'un échantillon quenché est plus petite que celle d'un échantillon non quenché et est transalée vers les faibles amplitudes. (voir figure V.2.).

b) Principe :

Pour établir un spectre, on fixe un canal de mesure étroit (de 0 à 10 par exemple). Une mesure est faite dans ce canal, que l'on déplace ensuite progressivement de place en place (de 10 en 10), depuis les amplitudes faibles jusqu'aux amplitudes les plus élevées (de 0 à 400 pour le canal A, du tritium).

c) Matériel :

Echantillons standards de tritium - Utiliser pour l'isotope, l'échantillon non quenché (n° 1) et l'échantillon le plus quenché (n° 10).



d) Méthode expérimentale :

- Placer la fiole en position de mesure ;
- Placer le canal au niveau des amplitudes les plus faibles : seuil inférieur à zéro (0) ; seuil supérieur à dix (10). On aura un canal de 0 à 10 ;
- mesurer la radioactivité de l'échantillon pendant une (1,00) minute ;
- Tout en conservant la même largeur de canal (de 1/40, déplacer celui-ci de place en place : 10 à 20, puis de 20 à 30, ... etc.) ;
- Après chaque déplacement, effectuer une mesure ;
- Lorsque les mesures de l'échantillon (n° 1) sont terminés redescendre le canal au niveau de 0 à 10, puis établir, comme précédemment, le spectre de l'échantillon le plus quenché (n° 10) ;
- Mesurer également la radioactivité de cet échantillon.

e) Résultats :

- Porter sur papier millimétré ordinaire, en ordonnées les radioactivités (IPM, impulsions par minute) et en abscisses les amplitudes. Tracer sur le même graphique les spectres de l'échantillon quenché et du non quenché.

V.1.3. Les méthodes de correction de quenching :

a) But :

Lors des mesures de radioactivité par scintillation en milieu liquide, la valeur de l'efficacité de comptage de l'isotope dépend de la présence ou non, dans le système scintillateur de composés produisant un affaiblissement lumineux (quenching). L'efficacité de comptage diminue lorsque le quenching augmente.

Les radioactivités relatives de différents échantillons ne peuvent être comparées entre-elles. La comparaison ne pourra se faire qu'après avoir transformé les radioactivités relatives (IPM) en radioactivités réelles (DPM).

Ceci est obtenu en :

1. déterminant pour chaque échantillon son efficacité de comptage (E).
2. divisant la radioactivité relative (IPM) par l'efficacité de comptage (E).

$$\text{Radioactivité réelle : DPM} = \frac{\text{IPM}}{E}$$

Dans la même manipulation, on verra comment l'on peut déterminer l'efficacité de comptage d'un échantillon.

Deux méthodes de calcul seront utilisées :

- la méthode du "rapport des canaux" ;
- la méthode de "standardisation externe" ;

b) Matériel :

- une série d'échantillons standards quenchés ^3H ;
- mélange scintillant.

V.1.3.1. Correction de quenching par la méthode "rapport des canaux" :

a) Principe :

Si un échantillon renferme des composés produisant du quenching, le comptage de l'isotope est abaissé et le spectre de distribution des impulsions électriques de comptage est déplacé vers les faibles amplitudes.

Le déplacement du spectre est d'autant plus important que le quenching est plus élevé. Il est possible d'établir une relation entre la position du spectre de l'échantillon et son efficacité de comptage.

Pour cela, on mesure la radioactivité de l'échantillon dans deux régions du spectre. Ces régions sont définies au moyens de canaux (A et B). Puis on calcule la valeur du rapport des radioactivités mesurées dans ces deux canaux. Cette valeur appelée "rapport des canaux (R)" diminue lorsque le quenching augmente, c'est-à-dire, lorsque l'efficacité de comptage diminue.

A partir d'une série d'échantillons renfermant une radioactivité connue (DPM) identique pour tous les échantillons et des quantités variables d'un composé quenchant, on détermine pour chaque échantillon :

-a- la valeur du rapport des canaux R :

$$R = \frac{IPM (B)}{IPM (A)} ,$$

-b- son efficacité de comptage E :

$$E = \frac{\text{radioactivité mesurée}}{DPM} = \frac{IPM (B)}{DPM}$$

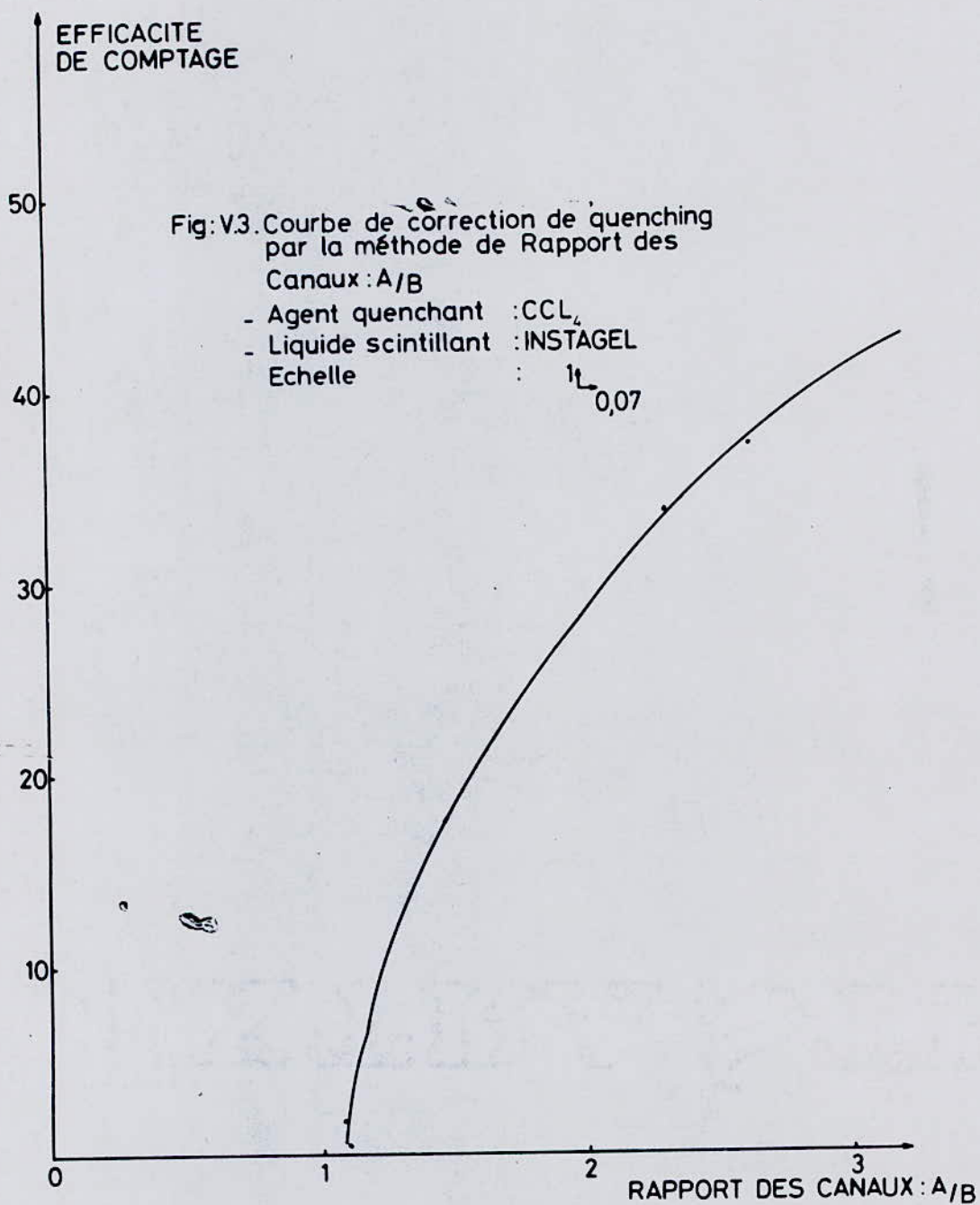
Ces valeurs permettent d'établir une relation :

$$E = f (R)$$

Les valeurs de R et de E peuvent être portées sur un graphique de coordonnées normales afin d'établir une "courbe de correction de quenching". (voir Figure V.3).

b) Détermination de la radioactivité réelle d'un échantillon :

Pour déterminer la radioactivité réelle (DPM) d'un échantillon, on mesure sa radioactivité relative (IPM) dans les canaux (B et A), puis on calcule le rapport de standardisation (R). Cette valeur (R) est reportée sur la



courbe de correction de quenching afin de déterminer l'efficacité de comptage (E) correspondante.

La radioactivité réelle est obtenue en divisant la radioactivité relative mesurée dans le canal de mesure B par l'efficacité de comptage:

$$\text{DPM} = \frac{\text{IMP (B)}}{E}$$

V.1.3.2. Correction de quenching par la méthode de "standardisation externe" :

a) Principe :

Comme dans la méthode du rapport des canaux, la méthode de standardisation externe est basée sur la mesure du déplacement du spectre d'impulsions de comptage.

Mais dans le cas présent, il ne s'agit pas des impulsions provenant du rayonnement β^- de l'isotope à mesurer et contenu dans la fiole de comptage (du tritium). Le spectre utilisé est celui provenant de l'irradiation du liquide scintillant contenu dans la fiole de comptage, par une source radioactive émettant un rayonnement γ et placée à l'extérieur de la fiole. La nature de cette source est différente suivant les marques d'appareils (^{133}Ba , ^{137}Cs (appareil Beckman), ^{226}Ra , etc...). Par absorption du rayonnement dans le milieu scintillant, il y a production d'électrons Compton présentant un spectre d'énergie voisin de celui des particules β^- émises par le tritium ^3H .

Les impulsions de comptage de la source externe sont distribuées suivant un spectre qui subira une translation si le milieu scintillant est quenché.

Pour établir une courbe de correction de quenching, on utilise comme précédemment une série d'échantillons standards de radioactivité comme (DPM) et renfermant des quantités variables d'agent quenchant.

Les mesures s'effectuent en trois (03) temps :

Premier temps : mesure de la radioactivité de l'échantillon ^3H dans les canaux A, B ou C :

IPM (A), IPM (B), ou IPM (C),

Deuxième temps : la source γ externe vient se placer sous la fiole et une seconde mesure a lieu dans les canaux D et E. Les radioactivités mesurées représentent alors la somme de celles dûes à l'échantillon ^3H et à la source externe γ , on a :

IPM (D) et IPM (E).

Troisième temps : la source externe est retirée de la chambre de mesure. Un comptage de l'échantillon ^3H est effectué dans les canaux D et E. Résultats de cette mesure :

IPM' (D) et IPM' (E).

Le rapport de standardisation externe est donné par le quotient :

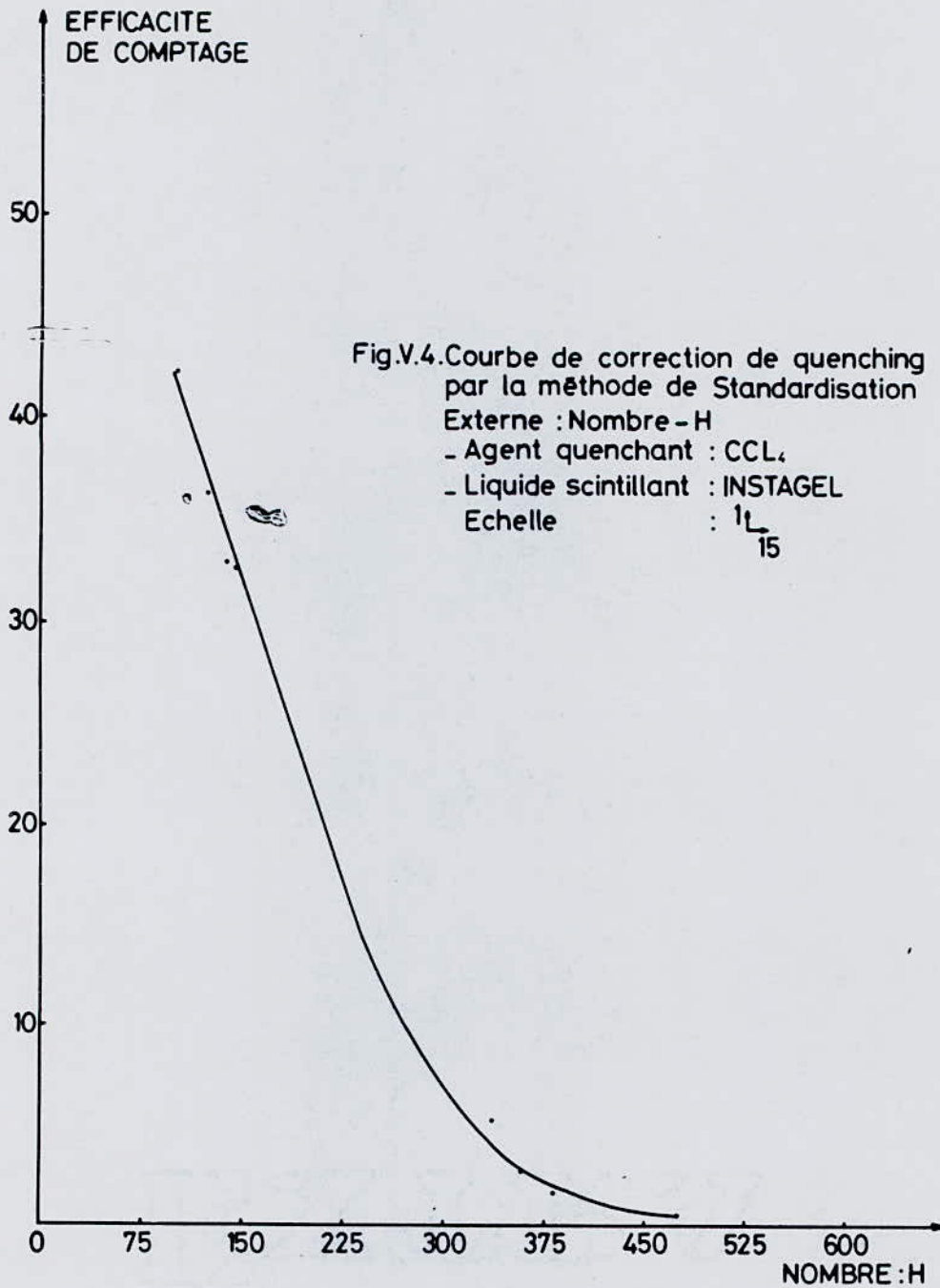
$$R = \frac{\text{IPM (D)} - \text{IPM' (D)}}{\text{IPM (E)} - \text{IPM' (E)}}$$

Les mesures et les calculs sont effectués automatiquement. La valeur de R est fournie directement.

L'efficacité de comptage est égale à :

$$E = \frac{\text{IPM (A, B ou C)}}{\text{DPM}}$$

Les valeurs de E et de R son portées sur un graphique, afin d'établir la courbe de correction de quenching correspondante (voir Figure V.4.).



CHAPITRE VI.

VI. RESULTATS EXPERIMENTAUX.

VI.1. Présentation des résultats partiels.

VI.1. Présentation des résultats partiels :

VI.1.1. Méthode de calcul du bruit de fond de l'appareil :

Le liquide scintillant utilisé est l'INSTAGEL. Nous mettons au comptage un flacon contenant un volume de 10 c.c d'INSTAGEL. le temps de comptage pour chaque mesure étant égal à 100 minutes.

Bfi (c.p.m)	12,81	12,27	12,37	13,92	13,63	12,81	12,53	14,56	13,01
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Bfi (c.p.m)	12,43	12,41	13,36	12,12	12,44	11,59	12,12	13,05
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Le bruit de fond de l'appareil est donc :

$$r_b = \overline{BF} = \frac{\sum_{i=1}^{17} BFi}{17} = \frac{217,43}{17}$$

$$r_b = \overline{BF} = 12,79 \text{ c.p.m.}$$

VI.1.1.1. Calcul de la déviation standard du bruit de fond de l'appareil :

Elle se calcule selon la formule :

$$\sigma_{r_b} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{17} (BFi - \overline{BF})^2 \right]^{\frac{1}{2}} ; n = 17$$

$$\sigma_{r_b} = \left[\frac{1}{16} \times (12,1945) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{r_b} = 0,76 \text{ c.p.m.}$$

$$r_b = \overline{BF} = (12,79 \pm 0,76) \text{ c.p.m.}$$

Remarque :

Le bruit de fond de l'appareil est recalculé une fois tous les mois.

VI.1.2. Eaux superficielles : E.S.

Pour chaque échantillon :

- Le volume est de..... : 10 c.c
- Le temps de comptage est de : 100 minutes.

Le bruit de fond de l'appareil étant de :

$$r_b = 12,79 \text{ c.p.m.},$$

VI.1.2.1. Région de Béni-Slimane (Médéa) :

Les caractéristiques de chaque échantillon sont données par le tableau VI.1.2.1.

Echantillon (Code)	Origine	Date de prélèvement	date de mesure
E.S. 01	Lac Collinaire (en surface)	12. 02. 85.	10. 04. 85.
E.S. 02	Oued Isser	12. 02. 85.	10. 04. 85.
E.S. 03	Nappe superficielle BS 21	12. 02. 85.	10. 04. 85.
E.S. 04	Oued Torcha	12. 02. 85.	08. 05. 85.
E.S. 05	Eau retenue BS	12. 02. 85	19. 05. 85.
E.S. 06	Oued Zeroua	19. 02. 85.	07. 05. 85.

Tableau VI.1.2.1.

VI.1.2.2. Résultats

Tous les résultats du tableau VI.1.2.2, sont données :

- en coups par minute..... : c.p.m.
- en activité par unité de volume..... : p.Ci/c.c.
- en unité tritium..... : UT

Echantillon (Code)	Taux de comptage (c.p.m.)			\bar{N}	\bar{N} -BF	Résultats		+/-	σ_{r_s}
	N_1	N_2	N_5			pCi/cc	UT		
E.S. 01	17,61	15,02	17,41	16,67	3,88	0,32	101,10	10,05	1,68
E.S. 02	16,80	12,48	14,95	14,77	1,98	0,16	51,64	7,19	2,38
E.S. 03	17,14	14,30	14,82	15,41	2,62	0,21	68,33	8,26	1,74
E.S. 04	14,90	15,10	15,38	15,12	2,33	0,19	60,77	7,79	0,90
E.S. 05	15,00	14,35	15,24	14,86	3,10	0,25	80,85	8,99	0,99
E.S. 06	16,21	16,02	16,24	16,15	3,36	0,28	87,64	9,36	0,88

Tableau VI.1.2.2.

VI.1.3. Eaux de nappes souterraines : ENS

Pour chaque échantillon :

- le volume est de: 10 c.c.
- le temps de comptage est de: 100 minutes

Le bruit de fond de l'appareil étant de :

$$r_b = BF = 12,69 \text{ c.p.m.}$$

VI.1.3.1. Région de Béni-Slimane (Médéa) :

VI.1.3.2. Région du Sahara : Sud - Centre, Sud - Ouest :

Les caractéristiques de chaque échantillon sont données par le tableau VI.1.3.1. pour la région de Béni-Slimane (Médéa), et par le tableau VI.1.3.2. pour la région du Sahara Algérien.

Echantillon (Code)	Origine	Date de prélèvement	Date de mesure
E.N.S. 01	Deux bassin (source)	18. 02. 85	05. 05. 85
E.N.S. 02	Eau de source Sohane	12. 02. 85.	05. 85. 85.

Tableau VI.1.3.1.

Echantillon (Code)	Origine	Date de prélèvement	Date de mesure
E.N.S. 03	Hassi PK 45 - Puits - Timimoun	26. 11. 84	10. 04. 85
E.N.S. 04	Hassi M'Guidène (forage) entre Timimoun - El Goléa.	26. 11. 84.	16. 04. 85.
E.N.S. 05	Adrar Z.I.	25. 11. 84.	16. 04. 85.
E.N.S. 06	Hassi Lossig (forage) Sud Ghardaïa	12. 12. 84.	16. 04. 85.
E.N.S. 07	Hassi PK 85 (Puits) - Timimoun	26. 11. 84.	16. 04. 85.
E.N.S. 08	Hassi Sbaa - Adrar:	25. 11. 84.	20. 04. 85.
E.N.S. 09	Hassi Hassi Tiberahmine (forage)	27. 11. 84.	29. 04. 85.
E.N.S. 10	El-Goléa - Sidi-Bouزيد	10. 12. 84.	22. 05. 85.
E.N.S. 11	Hassi El-Fhal (forage ancien)	11. 12. 84.	22. 05. 85.
E.N.S. 12	Hassi Badriène (forage)	26. 11. 84	25. 05. 85.
E.N.S. 13	Oufrane	27. 11. 84.	25. 05. 85.
E.N.S. 14	Hassi Teyara - Timimoun	25. 11. 84.	19. 05. 85.

Tableau VI.1.3.2.

VI.1.3.3. Résultats :

Tous les résultats du tableau VI.1.3.3, sont donnés :

- en coups par minute..... : c.p.m.
- en activité par unité de volume..... : PCI/c.c.
- en unité tritium..... : UT

Echantillon (Code)	Taux de comptage c.p.m.			\bar{N}	\bar{N} -BF	Résultats		+/-	σ_{r_s}
	N_1	N_2	N_3			pCi/cc	UT		
E.N.S. 01	15,21	15,86	16,35	15,80	3,01	0,25	78,51	8,86	1,04
E.N.S. 02	16,01	15,70	16,50	16,06	3,27	0,27	85,29	9,23	0,95
E.N.S. 03	17,98	13,91	15,49	15,79	3,00	0,25	78,25	8,84	2,23
E.N.S. 04	16,87	14,98	14,72	15,52	2,73	0,22	71,20	8,43	1,46
E.N.S. 05	17,92	14,08	13,93	15,30	2,51	0,20	65,46	8,09	1,42
E.N.S. 06	15,73	14,31	15,02	15,01	2,22	0,18	57,90	7,60	2,42
E.N.S. 07	17,31	15,67	15,96	16,31	3,52	0,29	91,81	9,58	1,12
E.N.S. 08	15,32	14,80	15,84	15,31	2,52	0,21	65,72	8,10	1,23
E.N.S. 09	15,16	14,66	15,22	15,01	2,22	0,18	57,90	7,60	1,01
E.N.S. 10	14,99	14,16	14,57	14,57	1,79	0,14	46,42	6,81	0,92
E.N.S. 11	14,42	14,47	14,50	14,46	1,67	0,13	43,55	6,59	0,96
E.N.S. 12	13,76	15,09	13,74	14,19	1,40	0,11	36,51	6,04	1,16
E.N.S. 13	15,30	14,56	14,80	14,88	2,09	0,17	54,51	7,38	0,95
E.N.S. 14	14,26	14,67	15,00	14,64	1,85	0,15	48,25	6,94	0,95

Tableau VI.1.3.3.

VI. 1. 4. Eaux de pluie : E.P.

Pour chaque échantillon :

- le volume est de..... : 10 c.c.
- le temps de comptage est de..... : 100 minutes

Le bruit de fond de l'appareil étant de :

$$r_b = BF = 12,79 \text{ c.p.m.}$$

VI.1.4.1. Région d'Alger :

Les caractéristiques de chaque échantillon sont données par le tableau VI.1.4.1.

Echantillon (Code)	Origine	Date de prélèvement	Date de mesure
E.P. 01	Pluviométrie station I.N.R.H. Bir-Mourad-Raïs.	26. 12. 84	20. 05. 85.
E.P. 02	Pluviométrie - Station INRH	Janvier 85.	29. 05. 85
E.P. 03	B S 1 (pluie)	09. 03. 85.	30. 04. 85.
E.P. 04	B S 21 M (pluie)	07. 03. 85.	29. 04. 85
E.P. 05	"Les sources" - Bir-Mourad-Raïs.	Déc. 84.	29. 04. 85
E.P. 06	C.E.N. (eau de pluie)	20,21.03.85.	20. 05. 85 .
E.P. 07	Blida (eau de pluie)	05. 03. 85.	26. 05. 85.
E.P. 08	"Les sources" - Sour 2	6,7et 8.03.85.	24. 04. 85.
E.P. 09	"Les sources" - Sour 3	6,7et 8.03.85.	24. 04. 85.
E.P. 10	"Les sources".	22,27. 03. 85.	04. 06. 85.
E.P. 11	Blida	06. 03. 85.	04. 06. 85.
E.P. 12	"Les sources"	Février 85.	04. 06. 85.
E.P. 13	"Les sources"	Déc. 84.	04. 06. 85.
E.P. 14	Blida	06. 05. 85.	08. 06. 85.
E.P. 15	Station I. N. R. H.	Février 85.	08. 06. 85.

Tableau VI.1.4.1.

VI.1.4.2. Résultats :

Tous les résultats du tableau VI.1.4.2., sont données :

- en coups par minute..... : c.p.m.
- en activité par unite de volume : pCi/c.c.
- en unité tritium..... : UT

Remarque:

Pour les eaux de pluie (E.P.10 à E.P. 15), le bruit de fond a été recalculé et est de :

$$r_b = BF = 11,89 \text{ c.p.m.}$$

Echantillon (Code)	Taux de comptage c.p.m.			\bar{N}	\bar{N} -BF	Résultats		+/-	σ_{r_s}
	N_1	N_2	N_3			pCi/cc	UT		
E.P. 01	15,18	14,92	15,32	15,13	2,34	0,19	61,03	7,81	0,89
E.P. 02	15,89	15,48	15,52	15,52	2,83	0,23	73,81	8,59	0,90
E.P. 03	17,61	17,99	17,66	17,75	4,96	0,41	129,30	10,96	0,89
E.P. 04	14,19	15,51	14,22	14,63	1,84	0,15	47,99	6,92	1,15
E.P. 05	14,73	16,06	15,03	15,27	2,48	0,20	64,68	8,04	1,12
E.P. 06	15,39	15,10	15,64	15,37	2,60	0,21	67,81	8,28	0,90
E.P. 07	16,14	15,34	14,86	15,44	2,65	0,22	69,12	8,31	1,08
E.P. 08	16,13	15,99	16,49	16,20	3,41	0,28	88,94	9,43	0,91
E.P. 09	17,32	16,42	17,74	17,15	4,36	0,36	113,70	10,66	1,10
E.P. 10	14,25	13,29	13,01	13,51	1,62	0,13	42,25	6,50	1,37
E.P. 11	14,09	13,53	13,83	13,81	1,92	0,16	50,07	7,08	1,36
E.P. 12	14,23	13,90	14,06	14,06	2,17	0,18	56,60	7,52	1,09
E.P. 13	14,27	13,78	13,58	13,87	1,98	0,16	51,64	7,19	1,17
E.P. 14	13,52	13,97	13,58	13,68	1,79	0,14	46,68	6,83	1,18
E.P. 15	13,68	13,35	14,56	13,86	1,97	0,16	51,38	7,17	1,98

Tableau VI.1.4.2.

VI.1.5. Eaux de mer :

Pour chaque échantillon :

- le volume est de..... : 10 c.c.
- le temps de comptage est de.. : 100 minutes.

le bruit de fond de l'appareil étant de :

$$r_b = 11,89 \text{ c.p.m.}$$

VI.1.5.1. Région d'Alger

les caractéristiques de chaque échantillon sont données par le tableau VI.1.5.1.

VI.1.6. Eaux potables : E.R.

Pour chaque échantillon :

- le volume est de..... : 10 c.c.
- le temps de comptage est de.. : 100 minutes

le bruit de fond de l'appareil étant de :

$$r_b = 12,79 \text{ c.p.m.} \quad (\text{pour E.R.01 et ER.03})$$

et de :

$$r_b = 11,89 \text{ c.p.m.} \quad (\text{pour E.R.03}).$$

Echantillon (Code)	Origine	Date de prélèvement	Date de mesure
E.M. 01	Zéralda Plage Bord de la mer - 1 -	07. 05. 85.	29. 05. 85.
E.M. 02	Zéralda Plage Bord de la mer - 2 -	07. 05. 85.	29. 05. 85.
E.M. 03	Zéralda Plage Bord de la mer - 3 -	07. 05. 85	08. 06. 85.
E.M. 04.	Zéralda Plage Bord de la mer - 4 -	07. 05. 85.	08. 06. 85.
E.M. 05.	Zéralda Plage Bord de la mer - 5 -	07. 05. 85.	12. 06. 85.

Tableau VI.1.5.1.

Echantillon (Code)	Origine	Date de prélèvement	Date de mesure
E.R. 01	CEN (eau du robinet)	Avril 85	22. 02. 85.
E.R. 02	BLIDA (eau du robinet)	Mars 85	26. 05. 85.
E.R. 03	Eau minérale "Saïda"	/	12. 06. 85

Tableau VI.1.6.1.

VI.1.5.2. Résultats :

Tous les résultats du tableau VI.1.5.2, sont donnés :

- en coups par minutes..... : c.p.m.
- en activité par unité de volume... : pCi/c.c.
- en unité tritium..... : UT

VI.1.6.2. Résultats :

Tous les résultats du tableau VI.1.6.2, sont donnés :

- en coups par minute..... : c.p.m.
- en activité par unité de volume... : pCi/c.c.
- en unité tritium..... : UT

Echantillon (Code)	Taux de comptage c.p.m.			\bar{N}	\bar{N} -BF	Résultats		+/-	σ_{r_s}
	N_1	N_2	N_3			pCi/cc	UT		
E.M. 01	13,03	12,73	14,08	13,27	1,38	0,11	35,99	5,99	1,78
E.M. 02	12,21	13,57	13,86	13,21	1,32	0,11	34,42	5,87	1,71
E.M. 03	12,09	12,92	14,16	13,05	1,16	0,09	30,25	5,50	1,80
E.M. 04	13,21	13,17	13,71	13,36	1,47	0,12	38,34	6,19	1,50
E.M. 05	12,84	13,17	13,84	13,28	1,39	0,12	36,24	6,02	1,55

Tableau VI.1.5.2.

Echantillon (Code)	Taux de comptage c.p.m.			\bar{N}	\bar{N} -BF	Résultats		+/-	σ_{r_s}
	N_1	N_2	N_3			pCi/cc	UT		
E.R. 01	15,60	15,45	16,40	15,81	3,02	0,25	78,77	8,87	1,53
E.R. 02	17,05	17,60	17,62	17,42	4,63	0,38	120,70	10,98	1,50
E.R. 03	13,33	12,68	12,94	12,98	1,09	0,09	28,42	5,33	1,51

Tableau VI.1.6.2.

CHAPITRE VII

VII. DISCUSSION DES RESULTATS.

Les techniques de comptage par scintillation liquide nous ont permis de mesurer les concentrations de tritium dans les eaux pluviales, souterraines, marines et potables. La méthode consistait à prélever des échantillons d'eau dans chaque milieu et de les enrichir par distillation et électrolyse avant de les diluer dans une solution scintillante et de les passer au comptage sur le spectromètre.

Nous allons présenter les résultats pour chaque type d'échantillon et discuter les précisions sur les valeurs minimales et maximales pour chaque milieu.

Eaux superficielles :

Valeur minimale :

$$51,64 \pm 7,19 \text{ UT (E.S. 02)}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{7,19}{51,64} \approx 14 \%$$

Valeur maximale :

$$101,10 \pm 10,05 \text{ UT (E.S. 01)}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{10,05}{101,10} \approx 9,9 \%$$

Valeur moyenne :

$$76,37 \pm 12,36 \text{ UT}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{12,36}{76,37} \approx 16,2 \%$$

Eaux des nappes souterraines :

Valeur minimale :

$$36,51 \pm 6,04 \text{ UT (E.N.S. 12)}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{6,04}{36,51} \approx 16,5 \%$$

Valeur maximale :

$$91,81 \pm 9,58 \text{ UT} \quad (\text{E.N.S. } 07)$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{9,58}{91,81} \approx 10,4 \%$$

Valeur moyenne :

$$64,16 \pm 11,33 \text{ UT}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } 11,33 \approx 17,7 \%$$

Eaux de pluie :

Valeur minimale :

$$42,25 \pm 6,50 \text{ UT} \quad (\text{E.P. } 10)$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{6,50}{42,25} \approx 15,4 \%$$

Valeur maximale :

$$129,30 \pm 10,96 \text{ UT} \quad (\text{E.P. } 03)$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{10,96}{129,30} \approx 8,5 \%$$

Valeur moyenne :

$$85,78 \pm 13,10 \text{ UT}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{13,10}{85,78} \approx 15,3 \%$$

Eaux de mer :

Valeur minimale :

$$30,25 \pm 5,50 \text{ UT (E.M. 03)}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{5,50}{30,25} \approx 18,2 \%$$

Valeur maximale :

$$38,34 \pm 6,02 \text{ UT (E.M. 04)}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{6,02}{38,34} \approx 15,7 \%$$

Valeur moyenne :

$$34,29 \pm 8,28 \text{ UT}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{8,28}{34,29} \approx 24,1 \%$$

Eaux potables :

Valeur minimale :

$$28,42 \pm 5,33 \text{ UT (E.R. 03)}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{5,33}{28,42} \approx 18,6 \%$$

Valeur maximale :

$$120,70 \pm 10,98 \text{ UT (E.R. 02)}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{10,98}{120,70} \approx 9,1 \%$$

Valeur moyenne :

$$74,56 \pm 12,21 \text{ UT}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur : } \frac{12,21}{74,56} \approx 16,4 \%$$

Il est important de noter que les pourcentages d'erreur enregistrés sont acceptables bien que dans certains cas, ils paraissent élevés. Ceci s'explique par les difficultés expérimentales liées à ce genre de travaux, mais également par le fait que les comptages d'échantillons radioactifs suivent des lois statistiques. Il est évident qu'un plus grand nombre de mesures sur chaque échantillon aurait donné de meilleurs résultats, cependant le temps dévolu à ce travail ne le permettait pas.

Une comparaison rapide entre les concentrations de tritium mesurées dans les eaux et les Concentrations Maximales Admissibles (CMA) définies par la C.I.P.R, montre que les premières sont de l'ordre du dixième (1/10) des secondes. Par conséquent, le risque radiologique est relativement faible.

A titre d'exemple, un calcul simplifié de dosimétrie interne donnerait une dose annuelle de 0,01 mrem pour une personne pesant 70 Kg et consommant environ deux litres d'eau potable dont la concentration de tritium est de 0,24 pCi/c.c (ou 75 UT). Rappelons que la demie-vie biologique du tritium est de l'ordre de dix (10) jours.

Les résultats expérimentaux obtenus font apparaître des concentrations de tritium relativement plus élevées dans les eaux de pluie que dans les autres échantillons (eaux marines, souterraines et potables). Ceci s'expliquerait par le fait que le tritium est produit continuellement dans l'atmosphère, grâce à l'action des rayons cosmiques et par conséquent sa décroissance radioactive est compensée dans une large mesure par une production ininterrompue.

Ainsi, les eaux de pluie entraînent dans leur chute des quantités appréciables de tritium dont les atomes se substituent à l'un des hydrogènes de l'eau pour former les molécules HTO.

Par contre, les concentrations de tritium dans les eaux souterraines, marines et potables diminuent régulièrement à cause de la décroissance radioactive et ne s'élèvent de nouveau que lorsqu'une recharge a lieu.

CHAPITRE VIII

VIII. CONCLUSIONS.

L'étude que nous avons faite nous a permis entre autres de nous familiariser avec les techniques de comptage, particulièrement la scintillation liquide.

L'application de cette méthode de comptage avait pour but de mesurer les concentrations de tritium dans les eaux pluviales, souterraines, marines, et potables et de comparer ensuite les concentrations obtenues pour les quatre milieux. Malgré la complexité de sa mise en oeuvre, sa souplesse d'utilisation la favorise par rapport aux autres techniques de comptage.

Certains types d'échantillons et certains environnements peuvent conduire à des taux de comptage faussement élevés. Ces événements peuvent résulter d'erreurs statistiques, d'erreurs systématiques, d'une distillation incomplète, du bruit de fond de l'électronique (coïncidence fortuite), du vieillissement des solutions standards, du vieillissement des solutions scintillantes, de la photoluminescence ou encore de l'électricité statique sur le flacon.

Lorsqu'une désintégration radioactive a lieu dans un mélange scintillant, il se produit un grand nombre de photons. En moyenne, un nombre égal de photons viennent heurter les deux photomultiplicateurs (PM) de l'appareil.

Une impulsion de tension est émise à partir des deux P.M. Les impulsions sont requises pour que l'évènement soit enregistré comme désintégration radioactive vraie.

S'il se produit une impulsion à partir d'un seul PM, un circuit électronique dit de "coïncidence" empêche cet évènement unique d'être enregistré comme un coup. Il est alors possible de "duper" l'électronique de l'appareil et d'enregistrer ces évènements uniques comme coups valables.

La photoluminescence, quant à elle, provient de l'irradiation du mélange scintillant ou du flacon par la lumière solaire et peut-être provoquée par les fenêtres d'un laboratoire.

Tout comme la chimiluminescence, la photoluminescence est de faible énergie et décroît avec le temps. Heureusement, sa décroissance est très rapide (15 à 30 mn).

L'électricité statique est probablement la cause la moins connue des problèmes de comptage en scintillation liquide. L'électricité statique est de nature imprévisible. Elle est particulièrement gênante en hiver en atmosphère desséchée en raison du chauffage.

Contrairement à la photoluminescence, l'électricité statique peut posséder une énergie bien plus élevée (supérieure au ^{14}C) et ne décroît pas à un taux prévisible mais plutôt par à - coups.

Cependant, nous pouvons l'éliminer en essuyant les flacons avec un torchon humecté de solvant (éthanol ou méthanol) ou au moyen d'un éliminateur statique tel que l'émetteur alpha ^{210}Po .

Toutes ces précautions prises, la qualité des résultats sera améliorée en grande partie.

Il nous a été possible, grâce à une étude déjà entamée, de montrer le grand intérêt hydrogéologique de l'application de ces techniques de comptage, ceci grâce à une étude faite sur la nappe du Nerf de Bouteldja dans la wilaya d'El-Terf

Grâce donc aux efforts déployés pour étudier la recharge éventuelle de la nappe BG (eau de source de BOUGLES - Annaba) par la nappe BR (Amont de BG, BOURDINE) ou par les précipitations, et ceci par l'équation de bilan, la spectrométrie par scintillation liquide a pu trancher en confirmant la supposition qui avait déjà été avancée, puisque les teneurs en tritium de la nappe BG étaient nettement supérieures aux teneurs en tritium de la nappe BR, la recharge pouvant donc provenir que des précipitations, vu que la nappe BR se trouvait à l'amont de la nappe BG.

Par ailleurs, la présence des matières radioactives et des rayonnements dans le milieu ambiant expose à une irradiation externe l'organisme de ceux qui, en raison de leur profession, se trouvent en contact avec ces matières. De plus, lorsqu'elles pénètrent à l'intérieur de l'organisme, il y a danger d'irradiation de certains organes. C'est pourquoi le radioprotectionniste doit pouvoir conseiller l'utilisateur des matières radioactives ou d'autres sources de rayonnements sur les moyens à employer pour se protéger. Indépendamment de l'exposition des travailleurs, il y a aussi des risques d'irradiation pour la population en général. Cette constatation a amené les radioprotectionnistes à définir la notion de niveaux maximaux admissibles pour l'exposition des populations et des travailleurs et pour leur protection en général.

À l'avenir, la qualité des résultats pourra être améliorée grâce à l'utilisation du mélange scintillant MP Beckman, lequel présente une stabilité thermique à long terme entre 10° et 30° C en phase liquide claire et en phase gel,

et une possibilité d'accepter de grands volumes d'échantillons : solutions aqueuses, tampon, échantillons fortement acides ou basiques. Parmi tous les cocktails, c'est avec le MP que l'on obtient la meilleure efficacité de comptage du tritium et donc la plus grande vitesse de comptage pour les échantillons à faible activité.

Enfin d'autres applications particulières dans le comptage en scintillation liquide pourront se faire sur des échantillons biologiques.

Les principales difficultés qui surgissent avec ce type d'échantillons, sont l'affaiblissement par la couleur, l'impureté et la solubilité limitée de l'échantillon. Tout cela réduit l'efficacité de comptage, et des corrections appropriées deviennent nécessaires.

Comme nous le voyons, le champ d'application de la scintillation liquide est relativement large puisqu'elle est utilisée dans beaucoup de disciplines telles que : la médecine, la biologie, l'hydrologie, la datation, ... etc.

Vu la nouveauté du sujet, nous nous sommes efforcés de faire un document aussi complet que possible et nous pensons avoir atteint l'objectif que l'on s'était fixé ; bien que le temps relativement court qui nous était dévolu pour la préparation de ce mémoire ne nous a pas permis d'effectuer des investigations beaucoup plus profondes.

Table des tableaux

Tableau VI.1.2.1. Caractéristiques des échantillons d'eaux superficielles

Tableau VI.1.2.2. Résultats : Eaux superficielles.

Tableaux VI.1.3.1.

et VI.1.3.2. Caractéristiques des échantillons d'eaux de nappes souterraines.

Tableau VI.1.3.3. Résultats : Eaux de nappes souterraines.

Tableau VI.1.4.2. Caractéristiques des échantillons d'eaux de pluie.

Tableau VI.1.4.2. Résultats : Eaux de pluie.

Tableau VI.1.5.1. Caractéristiques des échantillons d'eaux de mer.

Tableau VI.1.5.2. Résultats : Eaux de mer.

Tableau VI.1.6.1. Caractéristiques des échantillons d'eaux potables

Tableau VI.1.6.2. Résultats : Eaux potables

Table des figures

Fig. II.2. Spectre de désintégration du tritium.

Fig. V.2. Spectres de distribution du tritium (non quenché) et (quenché).

Fig. V.3. Courbe de correction de quenching par la méthode de rapport des canaux : A/B.

Fig. V.4. Courbe de correction de quenching par la méthode de Standardisation Externe : Nombre H.

ANNEXE

. *Lexique*

. *Tableau de correspondance des unités.*

LEXIQUE

A

Amplitude de l'impulsion : Valeur de la tension maximale élevée.

Amplificateur logarithmique : Montage électronique permettant d'obtenir en sortie des impulsions électriques dont les amplitudes varient comme le logarithme de l'amplitude des impulsions à l'entrée;

Anode : Electrode portée à un potentiel positif par rapport à une électrode, dans un photomultiplicateur, l'anode délivre le signal électrique.

Antineutrino : Antiparticule du neutrino dont il diffère par son spin. Des antineutrinos sont émis lors des désintégrations radioactives qui conduisent à des émissions β^- .

Atome : La plus petite partie du corps simple susceptible d'entrer dans des combinaisons chimiques. L'atome est constitué d'un noyau composé de protons et de neutrons, et entouré d'électrons répartis sur des orbites.

B

Bande d'analyse ou voie d'analyse : Canal définissant un domaine d'intérêt (domaine d'énergie par exemple).

Béta moins : Processus radioactif au cours duquel le nombre de charge et le numéro atomique d'un radionucléide augmentent d'une unité et le nombre de masse reste inchangé.



Bruit de fond : Comptage parasite dont l'origine est essentiellement électronique : bruit de fond des photomultiplicateurs d'un compteur à scintillation.

C

Canal : Domaine d'amplitude situé entre deux seuils.

Cérenkov : Effet Cérenkov, phénomène lumineux produit lorsqu'une particule chargée traverse un milieu transparent avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans ce milieu.

Coïncidence : Apparition d'impulsions électriques, dans un intervalle de temps déterminé sur chacune des deux voies de détection. Pour qu'il y ait coïncidence il faut que l'intervalle de temps soit plus petit que le temps de résolution du système.

Coïncidence d'impulsions : Etats de deux impulsions se présentant en un point au même instant : la coïncidence des impulsions issues de deux P.M. voyant le même signal permet d'éliminer certains bruits de fond.

C. P. M. : Coups par minute - équivalent à I.P.M - mais est une mauvaise traduction de count par minute : C.P.M.

Comptage : Détermination du nombre d'impulsions électriques fournies par un détecteur de rayonnement - Impulsions par minute = i.p.m.

Courant d'obscurité : Courant émis par l'ensemble photocathode - photomultiplicateur en l'absence de rayonnement.

Curie : Unité de radioactivité (Ci). C'est l'activité d'une quantité de radio-nucléide dans lequel le nombre de désintégration par seconde est le $3,7 \cdot 10^{10}$.

Sous-multiples : le mCi (millicurie) et le μ Ci (microcurie).

1 μ Ci = $2,22 \cdot 10^6$ désintégration par minute

1 Ci \neq $3,7 \cdot 10^{11}$ Bq (Bequerel).

D

Décroissance radioactive : Variation de la radioactivité en fonction du temps :

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N : nombre d'atomes radioactifs au temps t,

N_0 : nombre d'atomes initiaux,

λ : constante de désintégration.

Discriminateur d'amplitude : Appareil permettant d'éliminer les impulsions d'amplitudes inférieures à une valeur donnée.

Distribution normale de Gauss : La distribution de Poisson des comptages peut-être considérée comme gaussienne si leur valeur est supérieure à 50, l'écart-type de la distribution est alors égale à la racine carrée du comptage.

Distribution de Poisson : Distribution caractérisant la fréquence des comptages résultant de la mesure d'une source radioactive.

Dynode : Plaque métallique située dans un photomultiplicateur qui permet la multiplication des électrons de la photocathode.

E

Effet Compton : Diffusion élastique d'un photon (X ou γ) sur un électron. Une partie de l'énergie du photon est cédée à l'électron, le reste est conservé par le photon diffusé.

Effet photoélectrique : Transfert à un électron orbital de la totalité de l'énergie d'un photon.

Efficacité de comptage : Lors d'une mesure de radioactivité, rapport entre le résultat de la mesure, exprimé en impulsions par minute et la radioactivité réelle exprimée en désintégration par minute.

F

Fluorescence : Désexcitation d'électrons singulets par émission de photons : c'est le phénomène utilisé pour détecter les rayonnements à l'aide de scintillateurs.

G

Gain d'un amplificateur : Rapport entre l'amplitude du signal de sortie et celle du signal d'entrée.

I

Impulsion électrique : Variation, aux bornes d'une impédance, d'une tension caractérisant un évènement.

Incertitude : Valeur de l'intervalle de confiance d'un comptage.

I. P. M. : Nombre d'impulsions électriques fournies pendant une minute par un détecteur de rayonnements.

Isotope : Un des nucléides isotopes d'un élément donné.

Isotope radioactif : Nucléide qui peut subir une désintégration radioactive.

L

Luminescence : Emission lumineuse produite par certaines substances radioactives lorsqu'elles sont soumise à un rayonnement.

Le rayonnement émis est caractéristique de la substance et sa longueur d'onde est supérieure à celle du rayonnement qui a induit la luminescence.

M

Mouvement propre : Comptage obtenu en l'absence de la source à mesurer et dont il faudra soustraire la valeur à la mesure faite en présence de la source. Le mouvement propre est dû aux rayonnements ambiants d'origine cosmique, tellurique, ... et au bruit de fond d'origine thermique et électronique.

P

Particule bêta : Electron comportant une charge positive (β^+) ou une charge négative (β^-) émis par un noyau au cours d'une désintégration radioactive.

Période : Temps au bout duquel la radioactivité ou le nombre d'atomes radioactifs d'une source est moitié à la valeur initiale.

$$T = \frac{\text{Log}2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

T : période

λ : constante de désintégration

synonyme : demi-vie.

Phosphorescence : Désexcitation d'électrons Π triplets par émission de photons : provoque un bruit de fond parasite dans les scintillateurs.

Photocathode : Cellule photoélectrique semi-transparente qui émet des électrons quand elle reçoit des photons.

Photomultiplicateur : Appareil formé d'une photocathode et d'un multiplicateur d'électrons. Il permet de transformer un signal lumineux en un signal électrique.

Préamplificateur : Dispositif électronique d'amplification placé entre un détecteur de rayonnements et un amplificateur;

R

Radioélément : Élément chimique radioactif. Ce terme est habituellement utilisé pour désigner un radioisotope.

Radioélément artificiel : Radioélément obtenu uniquement par intervention humaine. L'obtention se fait par bombardement de noyaux stables au moyen de particules issues d'un réacteur nucléaire ou d'un échantillon.

Radioélément naturel : Radioélément dont la formation n'est pas due à une intervention humaine.

Rayonnement cosmique : Rayonnement d'origine extra-terrestre, constitué de protons (85 %) et d'hélium (14 %) de grande énergie, et appelé rayonnement cosmique primaire, lequel par interaction sur les hautes couches de l'atmosphère engendre un rayonnement cosmique secondaire.

Résolution : En spectrométrie de rayonnement : quotient entre la largeur à mi-hauteur du pic et l'abscisse du pic.

S

Scintillateur : Dans un compteur à scintillateur, c'est la partie sensible du détecteur qui émet des photons lumineux sous l'action des rayonnements.

Scintillation : Luminescence (fluorescence) provoquée par des rayonnements, irradiant un scintillateur liquide.

Sélecteur d'amplitude : Appareil permettant de classer les impulsions selon leur amplitude.

Seuil : Valeur de l'amplitude définie par le discriminateur.

Spectre : Courbe représentant la distribution d'un rayonnement en fonction de son énergie. Le spectre est représenté par la variation dN/dE en fonction de E , où dN : est le nombre de photons ou particules d'énergie égale à dE , et E l'énergie en keV ou en MeV.

T

Taux de comptage : Nombre d'impulsions ramené à l'unité de temps à la sortie d'un dispositif de détection d'une source radioactive.

UNITES	Unités Tritium UT	$\mu\text{Ci}/\text{m}^3$	$\mu\text{Ci}/\text{litre}$	$\mu\text{Ci}/\text{ml}$	pCi/ml	dpm/ml
1 UT	1	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-6}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$7,09 \cdot 10^{-3}$
1 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	313,8	1	10^{-3}	10^{-6}	1	2,22
1 $\mu\text{Ci}/\text{l}$	$3,13 \cdot 10^5$	10^5	1	10^{-3}	10^3	$2,22 \cdot 10^3$
1 $\mu\text{Ci}/\text{ml}$	$3,13 \cdot 10^8$	10^6	10^3	1	10^6	$2,22 \cdot 10^6$
1 pCi/ml	313,8	1	10^{-3}	10^{-6}	1	2,22
1 dpm/ml	140,8	0,45	$4,50 \cdot 10^{-4}$	$4,50 \cdot 10^{-7}$	0,45	1

Correspondance des unités - sens de lecture \rightarrow
Période du tritium 12,23 ans (A.I.E.A - 1981).

Les caractéristiques et résultats des échantillons BG et BR sont donnés par les tableaux suivants :

Caractéristiques : nappe du Nerf de Bouteldja W - TERF.

Echantillon (code)	Origine	Date de prélèvement	Date de mesure
BG	BOULGES Eau de la source (Annaba)	18. 11. 84.	13. 04. 85.
BR	BOURDINE Amont de BG	19. 11. 84.	13. 04. 84.

Résultats :

Echantillon (Code)	Taux de comptage c.p.m.			\bar{N}	\bar{N} -BF	Résultats		+ / -
	N_1	N_2	N_3			pCi/cc	UT	
BR	16,71	13,52	13,09	14,44	0,88	0,07	20,94	4,6
BG	17,31	16,67	15,96	16,31	2,67	0,22	69,62	8,34

Bibliographie

- * A.I.E.A. (*Agence Internationale de l'Energie Atomique*) - *Isotopes in hydrology* - SM 16.
- * R. BIBRON - *Rapport C.E.A.* - R2629 - Année 1965.
- * R. CONSTANT - *Les radioéléments* - Bruxelles - Année 1974.
- * G. FRIEDLANDER, J. W. KENNEDY, J. MALCOHM MILLER - *Nuclear and Radiochemistry, Second Edition. U.S.A.* - année 1964.
- * INSTRUCTIONS BECKMAN - *Liquid Scintillation Systems* - R 015 - 556331, Section Four - U.S.A. - Année 1981.
- * J. JOUZEL - *mesure du Tritium dans de faibles quantités d'eau à la teneur naturelle, C.E.N SACLAY* - Année 1973.
- * D. MATHIEU - *Scintillation liquide et solide, Beckman Instructions, FRANCE* - Année 1984.
- * NUCLEAR CHICAGO CORPORATION - *Liquid Scintillation Counting* - Année 1962.
- * M. ORIA et G. SIMMONET - *Mesures radioactives à l'aide des compteurs à scintillation liquide, Edition EYROLLES* - Année 1980.
- * R. PANNETIER - *Vade Mecum du technitium nucléaire, Tome II* - R PE41 - Année 1980.
- * ROCHE BIOELECTRONIQUE - *Manuel d'utilisation : une introduction au comptage par scintillation liquide, 2^e Edition* - R 12.67.001 - Année 1979.

