

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département de Biologie animale et végétale



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Biologie

Spécialité : Protection de l'environnement

Sujet

**Quantification de l'érosion hydrique par la technique
du Cs-137 : application du modèle proportionnel cas
du site forestier de Bainem.**

Soutenu le Mardi 16 juin 2015

Réalisé par: Melle KHIRÈCHE Lynda.

Présenté devant le jury:

Présidente: Mme D. Sadoudi-Ali Ahmed.

Professeur à l'UMMTO.

Promoteur: Mr A. Azbouche.

Chargé de recherche au CRNA.

Co-promoteur : Mr A. Oudjiane.

Maitre assistant classe «A » à l'UMMTO.

Examineur 1: Mme F. Sahmoune

Maitre assistante classe «A» à l'UMMTO.

Examineur 2: Mr Belamri M.

Maitre de recherche au CRNA.

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier en premier Mr Azbouche d'avoir bien voulu accepter de m'encadrer, et de m'avoir confié ce travail de recherche. En tant que promoteur, il s'est montré à l'écoute, et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire ; merci pour la patience, l'inspiration, l'aide et le temps que vous m'avez bien consacré, ainsi que pour vos précieux conseils.

Mes sincères remerciements s'adressent vivement à Mr Oudjiane, mon co-promoteur. Un grand homme remarquable, par ses actions, son génie, sa rigueur, sa perspicacité, et surtout sa simplicité et sa modestie. Merci de m'avoir orienté et offert cette occasion extraordinaire de réaliser un travail de recherche.

De ma part, et de la part de tous vos étudiants, nous saluons avec beaucoup d'humilité vos compétences pédagogiques, Votre capacité d'écoute, votre admirable patience, et votre amour du travail.

Je remercie Mme Sadoudi, d'avoir accepté de faire honneur de présider le jury de ma soutenance, ainsi que Mme Sahmoune et Mme Hocini d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'exprime ma sincère reconnaissance envers Mr Belamri, directeur de la division des techniques nucléaires du CRNA, de m'avoir accueilli dans sa division, et de m'avoir ouvert toutes les portes.

Je remercie également la conservation des forêts de Bainem, exceptionnellement Mr Benyahia youcef chef de bureau protection des ressources forestières, et toute son équipe d'avoir eu la gentillesse de nous guider et accompagner sur le terrain.

*Une pensée particulière est adressée à une brave femme exceptionnelle, sage, compétente, ingénieuse, intelligente, Mme Lakhdar Chaouèche Chafika chercheur au CRNA. Vous avez raison madame, vous n'avez pas besoin de parler beaucoup puisque vos qualités et vos compétences se sont chargés de le faire. Je tiens à souligner ma profonde admiration.
Grand respect.*

En fin un grand merci à l'ensemble de tous les enseignants, de la faculté des sciences biologiques et des sciences agronomiques de l'université de Mouloud Mammeri d'avoir alimenté ma soif de savoir et de compréhension.

J'espère témoigner bientôt sur le terrain professionnel l'efficacité de vos méthodes et la qualité de l'enseignement reçu.

Dédicace

La réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien, sans faille, moral, et affectif de mes très chers parents et grands parents, je les remercie de m'avoir donné un environnement idéal et de m'avoir enseigné les valeurs essentielles : humilité, modestie, honnêteté et passion, merci d'avoir su me comprendre dans les moments les plus difficiles et de m'avoir toujours fait confiance. Sachez que je vous suis et serai toujours très reconnaissante.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenu :

Mes chers frères Koceila et Yanis, mes sœurs Soraya, Lilia et surtout la gracieuse Sonia, de leur aide, leur soutien, leurs encouragements tout au long de mon parcours étudiantin. Je remercie également mes oncles et mes tantes, Mes cousines, et cousins, qui m'ont tant aidé et assisté.

A Mon fiancé, merci pour ta patience, merci pour tes conseils serviables et efficaces, sans ton aide précieuse, je n'aurai pas eu le cran de m'engager dans ce travail.

Merci à mes chers amis Karima, Imene, Mahmoud, Meziane et à toute ma promotion à qui je souhaite une bonne continuité.

A vous tous, ma famille, je dédie ce modeste travail en espérant avoir été à la hauteur des espoirs que vous avez placé en moi.

Lynda Khiréche.

SOMMAIRE

Les abréviations.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

INTRODUCTION GENERALE..... 01

Chapitre I Sol et Érosion du sol

I-1) Généralités sur le sol :

I-1-2) Définition..... 03

I-1-3) Les constituants du sol et leurs origines..... 04

I-1-4) Les fonctions du sol..... 05

I-1-5) Conséquences des pertes en sol..... 05

I-2) Érosion hydrique :

I-2-1) Définition de l'érosion hydrique..... 06

I-2-2) Types d'érosion..... 06

I-2-2-a) L'érosion en nappe ou « Sheet erosion »..... 07

I-2-2-b) L'érosion en rigole et en griffe « Rill erosion »..... 07

I-2-2-c) L'érosion en ravines « Gully erosion »..... 08

I-2-3) Facteurs de l'érosion des sols..... 08

I-2-3-a) Précipitations..... 08

I-2-3-b) Les caractéristiques de la couverture pédologique..... 09

I-2-3-c) Le mode d'utilisation des sols, la mosaïque paysagère et la végétation..... 09

I-2-3-d) Le relief 10

I-3) Processus de l'érosion :

I-3-1) Processus d'infiltration, et de ruissellement..... 10

I-3-2) Processus de détachement (l'action des gouttes de pluie)..... 10

I-3-3) L'entraînement des particules et l'érosion diffuse..... 10

I-3-4) Dépôt et sédimentation.....	11
I-4) Quantification de l'érosion hydrique :	
I-4-1) Modèle empirique : Équation universelle de perte du sol (USLE).....	11
I-4-2) Technique radio-isotopique.....	12
I-5) Les conséquences environnementales de l'érosion.....	12

Chapitre II Radioactivité et spectrométrie gamma

II-1) Radioactivité.....	13
II-2) Atome, isotope, les stables et les instables.....	13
II-3) Bases théoriques sur le rayonnement.....	14
II-3-1) Rayonnement Alpha.....	14
II-3-2) Rayonnements Beta et capture électronique.....	15
II-3-3) Rayonnement Gamma.....	17
II-4) Lois de désintégrations.....	17
II-4-1) Activité.....	17
II-4-2) période radioactive.....	17
II-4-3) Vie moyenne.....	18
II-5) Traceurs radioactifs dans le sol.....	18
II-6) Le césium- 137 (¹³⁷ Cs).....	18
II-6-1) Définition du césium-137.....	18
II-6-2) Origine du césium.....	19
II-6-3) Comportement environnemental du césium-137.....	20
II-6-4) Le césium et l'érosion des sols.....	20
II-6-5) Principe de la technique de césium-137.....	21
II-7) Spectrométrie Gamma.....	21
II-7-1) Principe de la technique.....	22
II-7-2) Description de la chaîne de spectrométrie gamma.....	22

II-7-2-a) Détecteur à semi-conducteur.....	22
II-7-2-b) Chaîne de mesure associée.....	22

Chapitre III Étude du milieu

III) Description de la région d'étude « forêt de Bainem » :

III-1) Localisation géographique.....	24
III-2) Historique.....	25
III-3) Aspect géologique, pédologique et hydrologique de la forêt.....	26
III-4) L'occupation du sol.....	26
III-4-1) La forêt.....	26
III-4-2) Les peuplements forestiers.....	26
III-4-2-a) Les Eucalyptus.....	26
III-4-2-b) Les peuplements en mélanges.....	27
III-4-2-c) Les peuplements de Pin d'Alep.....	27
III-4-2-d) Les peuplements de chêne liège.....	27
III-4-2-e) Les reboisements.....	27
III-5) Étude climatique.....	27
III-5-1) Caractéristiques bioclimatiques.....	28
III-5-2) Données climatiques.....	28
III-5-2-a) Précipitation.....	28
III-5-2-b) Température.....	29
III-5-2-c) Vent.....	30
III-5-3) Synthèse climatique.....	31

Chapitre IV Matériel et Méthode

IV-1) Échantillonnage.....	34
IV-1-1) Matériel utilisé.....	34
IV-1-2) Échantillonnage sur le site d'étude.....	35

IV-1-3) Mesure de la densité apparente.....	36
IV-1-4) Préparation des échantillons et conditionnements.....	37
IV-1-4-a) Préparation des échantillons.....	37
IV-1-4-b) Conditionnement des échantillons.....	38
IV-2) Analyse par spectrométrie gamma.....	39
IV-2-1) Analyse qualitative.....	39
IV-2-1-a) Étalonnage en Énergie.....	39
IV-2-1-b) Mesure de l'efficacité du détecteur.....	41
IV-2-2) Analyse quantitative.....	43
IV-2-2-a) Mesure de l'activité spécifique.....	43
IV-3) Application du modèle de conversion.....	45

Chapitre V Discussion et interprétation des résultats

V) Présentation des résultats et discussions.....	46
V-1) Détermination des activités du Cs-137 dans le sol.....	46
V-1-1) Activité du ¹³⁷ Cs dans le site de référence (BSSRC).....	46
V-1-2) Activité spécifique du Cs-137 au niveau du site d'étude.....	47
V-2) Estimation de la perte de sol.....	49
V-3) Interprétation des résultats.....	51
Conclusion Générale.....	53

Références bibliographiques.

Liste des abréviations :

A : Nombre de masse.

ADC: Analogique digital convertiser.

¹³⁷Ba : Baryum 137.

⁷Be : Béryllium 7.

BSSTC1 : Bainem série sud carotte 01.

BSSTC2 : Bainem série sud carotte 02.

BSSTC3 : Bainem série sud carotte 03.

BSSRC : Bainem série sud site de référence carotte.

Bq: Bequerel.

Ci: Curie.

CO₂: Dioxyde de carbone.

CREAMS: Chimiical Runoff Erosion and Management Systeme

CRNA : Centre de recherche nucléaire d'Alger.

Cs-137 : Césium 137.

Cu: Cuivre.

DRS : Défense et restauration des sols.

DSA 1000 : Desktop spectrometry analysies.

eV : Électron Volts.

FAO: Food Agriculture Organisation.

FRN : Fallout radio-nucleide.

Ge Hp : Germanium Hyper pur.

GUESS: Griffifh University Erosion and Sedimentation Systeme

I.N.R.F : Institut national de recherche forestière.

^{137}I : Iode 137.

keV : Kilo electron volts.

Mev: Million electron volts.

MFO : Matière organique fraîche.

N : Neutron.

O.N.M: Office national de la météorologie.

^{210}Pb : Plomb 210.

Rb: Rubidium.

RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation

Sn: Etain.

USLE: Universal Soil Loss Equation.

WEPP: Water Erosion Prediction Project.

^{137}Xe : Xénon 137.

Z: Proton.

Liste des figures :

Figure 01: structure du sol.	03
Figure 02: Localisation des zones concernées par la dégradation du sol.	06
Figure 03 : érosion en nappe.	07
Figure 04 : érosion en rigole.	07
Figure 05 : érosion en ravine.	08
Figure 06 : Action d'une goutte de pluie : effet splash.	09
Figure 07: mécanisme de l'érosion hydrique.	11
Figure 08 : Constituants d'un atome.	13
Figure 09 : Le pouvoir de pénétration des rayonnements.	14
Figure 10 : Désintégration alpha d'un noyau lourd.	15
Figure 11 : Désintégration β^+ .	15
Figure 12 : Désintégration β^- .	16
Figure 13 : Capture électronique.	16
Figure 14 : Émission gamma.	17
Figure 15 : Schéma de désintégration du césium-137.	19
Figure 16: Principe de redistribution du ^{137}Cs dans le sol.	21
Figure 17 : Dispositif expérimental de la spectrométrie gamma.	23
Figure 18 : DSA 1000.	23
Figure 19 : localisation de la forêt de Bainem.	24
Figure 20 : localisation de la zone d'étude.	25
Figure 21 : cumuls mensuels des précipitations (mm).	29
Figure 22 : Température moyenne mensuelle ($^{\circ}\text{C}$).	30
Figure 23 : moyenne mensuelle des vitesses du vent moyen (m/s).	31
Figure 24: Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN.	32
Figure 25 : Climagramme d'EMBERGER.	33

Figure 26 : Instruments d'échantillonnage.	34
Figure 27 : Profil topographique.	35
Figure 28 : Matériels de préparation des échantillons.	38
Figure 29 : Conditionnement des échantillons dans des Marinelli.	38
Figure 30 : Spectrométrie gamma.	39
Figure 31: spectre de la source radioactive.	40
Figure 32 : Courbe d'étalonnage.	41
Figure 33: Courbe de l'efficacité du détecteur.	43
Figure 34: profil de l'activité du Cs-137 au niveau du site de référence.	47
Figure 35 : profil de l'activité du Cs-137 au niveau de la carotte 01.	48
Figure 36 : profil de l'activité du Cs-137 au niveau de la carotte 02.	48
Figure 37 : profil de l'activité du Cs-137 au niveau de la carotte 03.	49
Figure 38 : distribution des activités spécifiques du Cs-137.	49

Liste des tableaux :

Tableau 01 : les constituants du sol.	04
Tableau 02: Principales caractéristiques du ¹³⁷ Cs.	19
Tableau 03 : coefficient de Cs137 dans le milieu terrestre.	20
Tableau 04 : Localisation de la zone d'étude par rapport à la station météorologique de DAR-EL-BEIDA selon les données géographiques.	28
Tableau 05: Cumuls mensuels des précipitations (mm) (O.N.M, 2008).	29
Tableau 06 : Moyenne mensuelle des températures moyennes (°C) (O.N.M, 2008).	29
Tableau 07: Moyenne mensuelle des vitesses du vent moyen en (m/s) (O.N.M, 2008).	30
Tableau 08 : Précipitations et températures moyennes mensuelles.	32
Tableau 09: Caractéristiques des points de prélèvement.	36
Tableau 10: Mesure de la densité apparente.	37
Tableau 11: Étalonnage en énergies de la chaîne de spectrométrie Gamma.	40
Tableau 12 : Les coefficients énergétiques de la droite d'étalonnage.	41
Tableau 13 : Valeurs de l'efficacité du détecteur.	42
Tableau 14: Valeur de l'efficacité pour la raie 661.6 keV du Cs-137.	43
Tableau 15: Résultat de l'analyse des échantillons de sol, et de l'activité spécifique du Cs-137 (Bq/kg) en fonction de la profondeur.	44
Tableau 16: les activités spécifiques en (Bq/m ²).	45
Tableau 17 : principaux résultats des activités spécifiques et surfaciques du Cs-137.	46
Tableau 18 : quantité de perte et gain de sol en t/ha/an.	52

Introduction générale :

Le sol constitue la plus importante ressource naturelle de l'humanité, c'est grâce à l'exploitation de cette ressource que nous avons vu naître et évoluer les différentes civilisations de l'antiquité jusqu'à notre époque moderne. Le ménagement de cette ressource et son amélioration continue peuvent assurer la prospérité de la société humaine à travers le temps (**Nahal, 1975**).

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays de la Méditerranée, et qui continue à prendre des proportions considérables en particulier sur les pentes raides à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains, du surpâturage et de l'impact défavorable des activités humaines : déforestation, incendie, mauvaise conduite des travaux agricoles, urbanisme chaotique, exploitation des carrières etc... (**Bou kheir et al., 2001**).

L'Algérie, à l'instar des pays de la Méditerranée, connaît actuellement de sérieux problèmes de dégradation des sols due à l'érosion hydrique et à ses effets. Les conséquences se traduisent par une diminution de la surface agricole, une baisse de fertilité et de productivité, une diminution de la capacité de stockage de l'eau par le sol, et en aval par une destruction des infrastructures, un engorgement des barrages et des inondations. Tout ceci contribue à une dégradation des conditions de vie du paysan qui surexploite ces ressources déjà fragiles en accentuant ainsi la dégradation de son propre milieu de vie. Les coûts d'aménagement et d'entretien des infrastructures ainsi que les pertes de productivité, se chiffrent par milliards de dinars (**Azbouche, 2015**).

Dès le début des années 70, plusieurs auteurs ont développé l'utilisation des radio-traceurs pour quantifier à l'échelle spatiale le processus de l'érosion des sols des régions de grandes cultures ; parmi les divers isotopes qui ont été suggérés comme traceurs du processus d'érosion, le césium-137 (^{137}Cs) s'avère particulièrement intéressant (**Bernard et al., 1995**).

Les mesures de ^{137}Cs permettent d'estimer l'ensemble des mouvements de sol, entraînement aussi bien que dépôt. Il est possible non seulement d'avoir une quantification globale en un lieu précis, mais aussi de spatialiser les mouvements de sol et leur importance. Une relation linéaire de proportionnalité entre les mouvements de sol et la variation de l'activité du ^{137}Cs a été proposée et utilisée par plusieurs chercheurs (**Mabit et al., 2008**).

La forêt constitue un moyen très efficace de conservation du sol, surtout si elle est équilibrée du point de vue biologique et bien aménagée. En Algérie elle est l'un des moyens les plus efficaces pour lutter contre la désertification, en particulier sur les terrains en pente rude. C'est grâce à sa

permanence, à sa structure en étages et à la nature de la couverture morte de son sol que la forêt possède ce privilège (**Nahal, 1975**).

L'objectif de ce travail est d'étudier et estimer le processus de l'érosion hydrique dans un site forestier de Bainem avec l'application du modèle proportionnel utilisé pour quantifier les pertes de sols en tonne/hectare/an dans les régions non cultivés ; et aussi pour évaluer l'efficacité des pratiques de conservation des sols.

Pour ce fait, le présent travail est subdivisé en cinq chapitres :

- ❖ Le premier chapitre traite des généralités sur le sol, le problème de l'érosion hydrique et ses conséquences ;
- ❖ Le deuxième chapitre expose quelques notions de base sur la radioactivité, et un aperçu sur la technique de spectrométrie gamma destinée pour le dosage des éléments radioactifs ;
- ❖ Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à la description du site d'étude sur le plan biologique, écologique et bioclimatologique ;
- ❖ Le quatrième chapitre explique les différentes étapes expérimentales du travail, échantillonnage sur le terrain, et analyses spectrométriques au laboratoire;
- ❖ Le dernier chapitre porte sur l'établissement des résultats obtenus des analyses de l'activité spécifique du Cs-137 et de l'application du modèle proportionnel ;

Enfin, nous terminerons notre étude par une conclusion générale où seront récapitulés les principaux résultats obtenus.

I-1) Généralités sur le sol:

Le mot « sol » est un mot banal que chacun utilise très fréquemment sans être nécessairement conscient de sa signification (**Duchaufaur, 1997**).

Les sols constituent avec les océans, l'un des deux grands compartiments originaux du globe terrestre, où la vie est particulièrement active. C'est un milieu vivant et dynamique, mais plus complexe que les océans, en raison de la diversité de ses constituants, des organismes qu'ils renferment et de ses organisations structurales et spatiales variées (**Walto et al., 2005**).

I-1-2) Définition :

Le sol n'est pas un milieu inerte et stable, mais il se forme, se développe, et évolue sous l'influence du climat et de la végétation.

A mesure que l'évolution du sol se poursuit, il s'approfondit et se différencie en couches successives ou « horizons » de plus en plus nombreuses, épaisses et distinctes dont l'ensemble constitue le profil (**Calvet, 2003**).

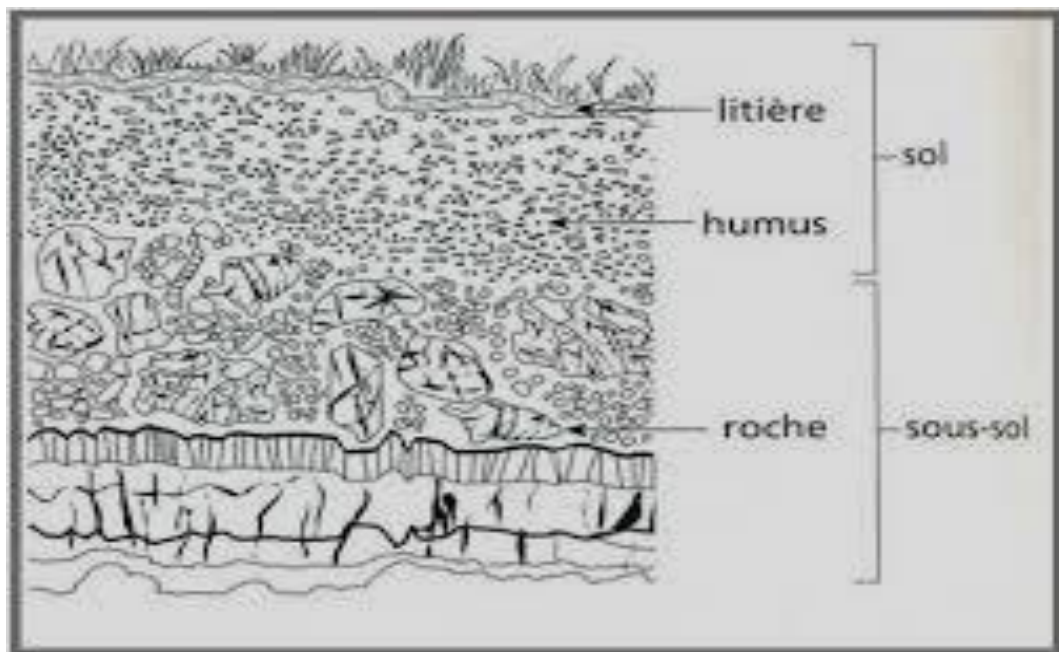


Figure 01: structure du sol (LE Bissonais et al., 2002).

Un sol est avant tout un « mélange » d'éléments solides constituant le squelette, de l'eau pouvant circuler ou non entre les particules, et de l'air.

Il est généralement le résultat de la dégradation mécanique ou chimique des roches de l'écorce terrestre. Certains sols particuliers qu'on dit organiques peuvent contenir des débris végétaux ou animaux en plus ou moins grande quantité. Les matériaux minéraux ou organiques sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables (**Schlosser, 2003**).

I-1-3) Les constituants du sol et leurs origines :

Le sol est constitué d'une fraction minérale et d'une fraction organique. Il est possible de tenter un parallèle entre l'évolution de la matière organique et celle de la matière minérale.

La matière organique fraîche (MOF) engendre l'humus, un peu de la même façon que les minéraux primaires donnent naissance à l'argile ; la MOF constitue donc la matière première de l'humus : elle est formée de débris végétaux et animaux de toute nature, qui se superposent au sol minéral (litière forestière), ou lui sont incorporés (milieux cultivés).

Les molécules complexes de la matière organique fraîche subissent d'abord une décomposition microbienne c'est à dire une transformation qui libère des composés simples, le plus souvent solubles, une partie subit le processus de minéralisation, c'est à dire se transforme en composés minéraux solubles ou gazeux (par exemple le CO₂) c'est la minéralisation « primaire » ; une autre partie échappe à la minéralisation et sert de matériau à l'édification de molécules nouvelles, de plus en plus complexes, de nature colloïdale et de couleur foncée dont l'ensemble constitue l'humus, au sens strict : c'est l'humification ; les composés humiques contractent des liens plus ou moins étroits avec les composés minéraux (argile et oxydes) puis ils se minéralisent à leur tour, mais plus lentement que la MOF, c'est la minéralisation « secondaire » (Calvet, 2003).

Tableau 01 : les constituants du sol.

	Constituants solides		Constituants liquide	Constituants gazeux
	minéraux	organique	Solution du sol	Atmosphère du sol
Origine	Désagrégation physique et altération biochimique des roches	Décomposition des êtres vivants	Précipitations, nappes, ruissellement.	Air hors sol, matières en décomposition, respiration
Critères de classement	Taille : granulométrie, qualité : minéralogie	Etat : Vivant, mort	Origine : Météorique, phréatique. Etat physique : Potentiel hydrique	Origine : Air, organisme.
Catégorie	Selon granulométrie : Squelette >2 mm Terre fine <2 mm Selon minéralogie : Quartz Minéraux silicatés Minéraux carbonatés	Qualité chimique : Organismes vivants Organismes morts MO héritées : cellulose, lignine, résines MO humifiée : acides fulviques et humiques, humines	Qualité chimique : Eau Substance dissoutes : glucide, alcool, acide organique et minéraux, cation et anion	Qualité chimique : Gaz de l'air : O ₂ , CO ₂ , N ₂ Gaz issu de la respiration et de la décomposition des organismes : CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , NH ₃ , N ₂ O...

I-1-4) Les fonctions du sol :

Du point de vue fonctionnel, les sols peuvent être définis comme des systèmes dynamiques, complexes, quadridimensionnels (espace-temps), qui comprennent 5 types de constituants principaux :

- Matière minérale.
- Matière organique.
- Solution.
- Gaz.
- Organismes vivants (Plantes, mésofaune, micro-organismes).

La norme ISO 11074 définit de façon suivante les différentes fonctions du sol :

- Le sol constitue un maillon très important de l'environnement, ses fonctions en sont valorisées ;
- Contrôle des cycles des éléments et de l'énergie en tant que compartiment des écosystèmes ;
- Support des plantes, des animaux et de l'homme ;
- Base des constructions et des immeubles ;
- Production agricole ;
- Rétention de l'eau et des dépôts ;
- Constitution d'une réserve génétique ;
- Conservation en tant que mémoire de l'histoire et de la nature ;
- Protection en tant qu'archive archéologique et paléoécologique (**Walto et al., 2005**).

I-1-5) Conséquences des pertes en sol :

Les principales conséquences des pertes en terre par l'érosion sont :

- Dégradation des fonctions écologiques du sol (filtre, régulation de l'écoulement, agent de transformation, zone tampon) ;
- Pertes de structure, migration des nutriments ;
- Diminution du profil et de la capacité de stockage de l'eau ;
- Différence de stades de maturité au sein d'une même zone cultivée ;
- Dépôts de sédiments (recouvrement de cultures, infrastructures routières) (**Bernard et al., 1995**).

I-2) Érosion hydrique :

La FAO s'est préoccupée des problèmes de dégradation des sols, elle a regroupé en 12 catégories ces divers phénomènes dont elle a entrepris une cartographie mondiale (**Duchaufaur, 2001**).

L'érosion hydrique constitue une des plus sérieuses formes de dégradation des sols agricoles. Ce phénomène contribue à réduire la productivité des sols affectés et constitue en outre une source majeure de pollution des eaux de surface en milieu agricole (**Bernard et al., 1998**).

I-2-1) Définition de l'érosion hydrique :

L'érosion est un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité. Elle causerait annuellement une perte de 25 milliards de tonnes de sol (**Walto et al., 2005**).

L'érosion hydrique a pour effet de déplacer les horizons de surface les plus fertiles, et même dans les cas graves la totalité du profil : elle est souvent sélective, dans la mesure où elle élimine préférentiellement la matière organique et la fraction fine, laissant sur place la fraction grossière (**Duchaufaur, 2001**).

I-2-2) Types d'érosion :

On distingue plusieurs types d'érosion hydrique : les plus importantes d'entre elles sont l'érosion en nappe, l'érosion en rigoles ou en griffes, et l'érosion en ravine.

I-2-2-a) L'érosion en nappe ou « Sheet erosion » :

Il s'agit d'une érosion uniforme à la surface du sol, lente et continue, elle provoque une usure homogène laquelle dans beaucoup de cas n'est pas perceptible (aucun accident sur le terrain). Elle attaque principalement l'horizon supérieur, qui est le plus riche non seulement en matière organique mais aussi en éléments nutritifs (**Aubert, 1986**).



Figure 03 : érosion en nappe (LE Bissonais et *al.*, 2002)

I-2-2-b) L'érosion en rigole et en griffe « Rill erosion » :

Pour peu qu'il y ait pente, les eaux se concentrent sur les accidents de terrain, trouvent un chemin d'écoulement et très vite creusent de petits canaux en rigoles. (Timhadjelt et al., 1992).

L'érosion en rigoles résulte de la concentration du ruissellement, en petits canaux assez bien définis. Ces canaux sont appelés des rigoles (SHELTON et al, 1989 in Hamadouche, 2004).



Figure 04 : érosion en rigole (LE Bissonais et *al.*, 2002)

I-2-2-c) L'érosion en ravines « Gully erosion » :

La lame d'eau en mouvement le long du versant, se divise progressivement. Les filets d'eau se regroupent dans les petites dénivellations du sol ; concentrée, cette eau déploie une force lui permettant d'arracher les particules, de creuser des griffes, des rigoles ; ces dernières

convergent, se réunissent et deviennent ravines. La taille des ravines peut varier de 50cm à plusieurs dizaines de mètres (Greco, 1966).



Figure 05 : érosion en ravine (LE Bissonais et *al.*, 2002)

I-2-3) Facteurs de l'érosion hydrique des sols :

I-2-3-a) Précipitations :

Les précipitations constituent l'agent essentiel de l'érosion hydrique. On appelle érosivité de la pluie, son aptitude à provoquer les phénomènes d'érosion (Walto et *al.*, 2005).

- **Caractères d'une pluie :**

- a) **Énergie cinétique des gouttes d'eau :**

C'est le premier élément déterminant de l'érosivité d'une pluie. Le diamètre des gouttes est variable, allant d'une fraction de quelques mm (bruine) à 5 ou 6 mm pour les pluies de tornade, jusqu'à 9 mm pour des averses exceptionnelles ou sous une voûte forestière (par effet de gouttière des grandes feuilles acuminées).

Dans les forêts primaires à frondaisons très hautes, sous bois claire et litière discontinue, les gouttes tombant des feuilles peuvent libérer également des énergies très fortes.

- b) **L'intensité d'une pluie :**

Elle constitue le deuxième caractère fondamental. Par intensité, on désigne la quantité d'eau (en mm) qui tombe en une durée de temps (minute) (Riou, 1990).

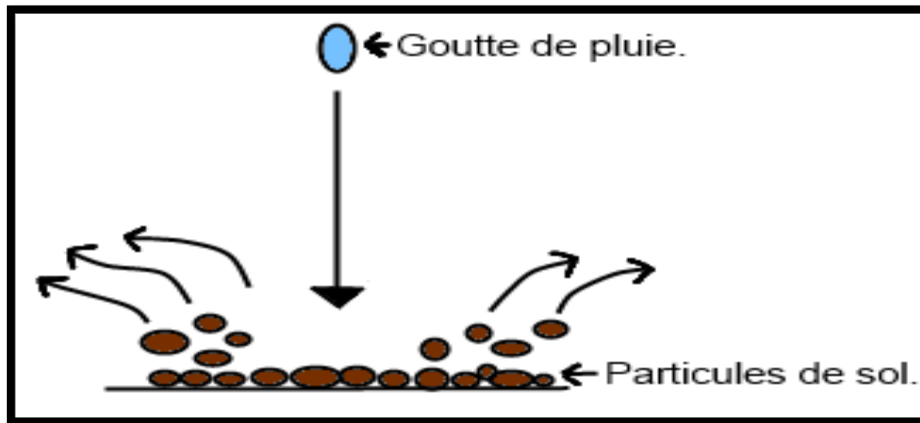


Figure 06 : Action d'une goutte de pluie : effet splash.

I-2-3-b) Les caractéristiques de la couverture pédologique :

La couverture pédologique joue un rôle essentiel sur les processus de ruissellement et d'érosion à travers sa capacité d'infiltration et son érodibilité.

Les caractéristiques les plus déterminantes sont celles de l'horizon de surface qui est directement soumis aux précipitations et à l'influence des agents atmosphériques ; quelles que soient les caractéristiques des horizons sous-jacents, il joue souvent le rôle d'obstacle principal à l'infiltration lorsque sa structure est dégradée par les conditions mécaniques (tassement du sol) et hydriques et qu'une croûte de battance se forme sous l'action des pluies (Walto *et al.*, 2005).

I-2-3-c) Le mode d'utilisation des sols, la mosaïque paysagère et la végétation :

De manière générale, l'érosion hydrique est surtout problématique dans des milieux où le taux de couvert végétal est faible, voir nul.

Ceci peut relever d'une situation structurelle liée à l'exploitation de la ressource :

- Des cultures peu couvrantes ou des périodes entre culture pendant lesquelles le sol est nu ;
- Le surpâturage, la déforestation ;
- Incidents passagers comme un incendie de forêt ;
- On peut également citer les facteurs tels que : substrat faible, pluies érosives, pentes raides qui font que le milieu est naturellement peu couvert (Walto *et al.*, 2005).

I-2-3-d) Le relief :

Le relief du terrain intervient sur l'érosion à travers deux aspects :

- D'une part la topographie, notamment la pente définie par les limites du bassin versant, qui vont déterminer le régime d'écoulement des eaux sur les versants et donc le transport et l'arrachement des particules de sol ;

- D'autre part, la nature des matériaux sous-jacents du sol qui pourront créer une interface modulant l'érodibilité du milieu, tantôt limitant la profondeur des incisions, tantôt favorisant l'érosion des sols par des conditions hydrologiques favorables (**Walto et al., 2005**).

I-3) Processus de l'érosion :

Le moteur des phénomènes d'érosion hydrique est le ruissellement superficiel. Ruissellement et érosion sont le résultat d'interactions complexes entre les facteurs pluies, les caractéristiques du sol, les modes d'utilisation des sols, la géomorphologie, qui déterminent une série de processus :

I-3-1) Processus d'infiltration, et de ruissellement :

L'eau de pluie qui arrive à la surface du sol s'infiltré, elle est stockée et redistribuée dans le sol selon ses caractéristiques physiques.

Une partie de l'eau non infiltrée s'accumule dans un premier temps à la surface du sol : c'est le **flaquage**. L'infiltration est alors contrôlée par la pression hydrostatique exercée par la lame d'eau stockée en surface.

Lorsque le volume d'eau en excès stocké en surface excède la détention superficielle, l'eau s'évacue latéralement par gravité : c'est le **ruissellement**.

I-3-2) Processus de détachement (l'action des gouttes de pluie) :

Les gouttes de pluie exercent deux types d'actions à la surface du sol : d'une part une action de désagrégation des mottes et agrégats par différents mécanismes qui sont l'éclatement, la dispersion mécanique, et d'autre part un déplacement par rejaillissement des fragments ainsi individualisés, appelé « **Splash** ».

I-3-3) L'entraînement des particules et l'érosion diffuse :

La surface des sols est souvent marquée par des griffes d'érosion qui sont des petites incisions discontinues de quelques mm de profondeur ; l'érosion diffuse peut déplacer des quantités importantes de terre.

I-3-4) Dépôt et sédimentation :

La terre déplacée par érosion diffuse ou concentrée peut se déposer à la faveur d'un obstacle, d'un changement d'état de surface ou de végétation, ou encore d'une diminution de la pente qui réduit la compétence du ruissellement. On a alors formation d'un atterrissement en général en bas de parcelle ou en bas de versant (**Walto et al., 2005**).

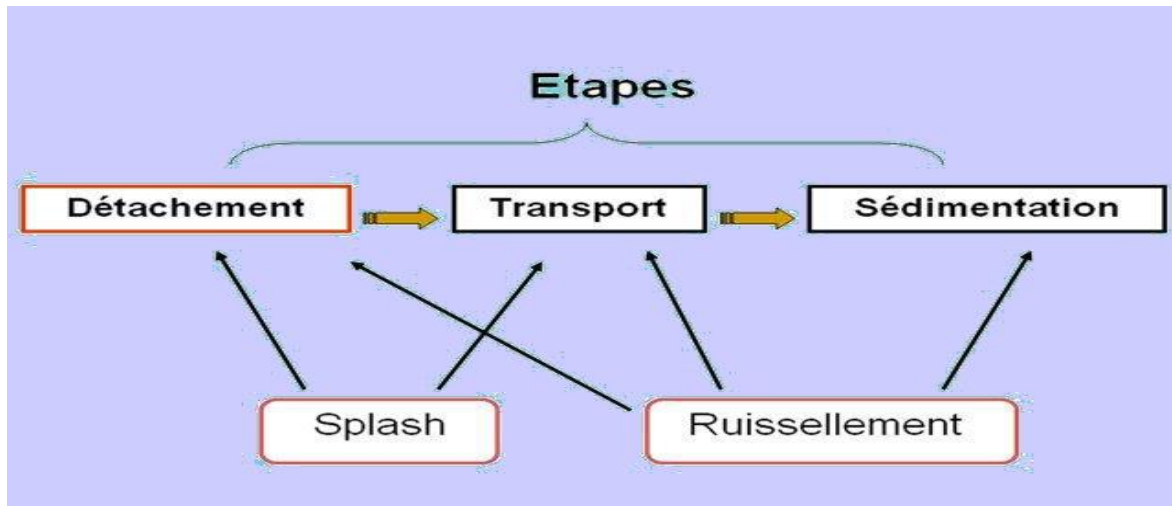


Figure 07: mécanisme de l'érosion hydrique.

I-4) Quantification de l'érosion hydrique :

L'érosion des terres a très tôt préoccupé les hommes qui ont bien vu le risque de perdre le capital non renouvelable qu'il représentait (**Ramade, 2009**).

Il y a eu beaucoup de travaux de terrain pour situer les problèmes, pour calculer les pertes en terre et aussi des travaux de laboratoire pour mieux comprendre les mécanismes fins qui détruisent la structure et déclenchent le transfert latéral des particules en suspension (**Walto et al., 2005**).

Les modèles les plus utilisés pour évaluer le taux d'érosion sont en général :

- ✓ Modèles empirique (RUSLE, USLE) ;
- ✓ Modèles mécanistes (WEPP, CREAMS, GUESS) ;
- ✓ Technique radio-isotopique (^{137}Cs , ^7Be et ^{210}Pb).

I-4-1) Modèle empirique : Équation universelle de perte du sol (USLE):

Le modèle d'érosion le plus largement utilisé pour estimer et prévoir les pertes de sol est l'équation universelle USLE élaborée par Von WISCHMEIER & SMITH (1958, modifiée en 1978).

Ce modèle prévoit l'importance des pertes de terre qui résultent de l'érosion en nappe ou en rigoles sur une pente simple sans toutefois tenir compte des pertes de terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$A = R * K * S * L * C * P$$

A : Pertes exprimées en tonnes/ha/an ;

R : Facteur d'érosivité des pluies ;

K : Sensibilité du sol à l'érosion ;

S.L : Facteur pente, S : Degré d'inclinaison, L : Longueur ininterrompue de la pente ;

C : Utilisation des sols en mode de culture ;

P : Mesures de protection éventuellement mises en œuvre.

I-4-2) Technique radio-isotopique :

Depuis 1960, les retombées nucléaires d'origines naturelles ou artificielles ont été utilisées comme traceurs pour étudier l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments, parmi plusieurs traceurs, le césium-137 est l'isotope le plus utilisé.

La technique du Cs-137 est un outil efficace pour une évaluation rapide de l'érosion et permettent une localisation des zones prioritaires pour les interventions d'aménagement des bassins versants en vue de leur restauration (**Kessaissia, 2010**).

I-5) Les conséquences environnementales de l'érosion :

Les effets néfastes de l'érosion sont multiples. Nous rappellerons bien sur les pertes en bonnes terres arables, le recouvrement des semis, mais aussi tous les dégâts provoqués ensuite en aval : inondations des réseaux de collecte des pluies, érosion des talus et dégradation des routes.

Tout ceci coute cher aux collectivités. On considère que le ruissellement et l'érosion se sont accrus dans les bassins versants en liaison avec la déforestation, la dégradation du sol ou sa couverture par des constructions diverses ; cela expliquerait l'aggravation des risques d'inondation au niveau du territoire.

Il est important de s'intéresser aux conséquences de l'érosion sur la qualité des eaux de surface. La charge solide des cours d'eau, en particulier la fraction fine (<50 µm) augmente, la partie entraînée du sol étant la partie la plus superficielle et la plus fine, elle est aussi la plus riche en nutriments minéraux, en matière organiques et en polluants (**Robert, 1996**).

La biologie, l'agronomie et plus encore la médecine sont incontestablement les domaines bien connus et souvent décrits dans lesquels la radioactivité est quotidiennement utilisée. La radioactivité naturelle et les isotopes présents dans la nature sont une source inépuisable d'informations pour les sciences de la terre.

Une fois pour toute, il faut reconnaître que les radio-isotopes ont été, et restent les outils d'une révolution dans l'exploration du monde vivant (**Caillot, 2002**).

II-1) Radioactivité :

La radioactivité est un phénomène naturel et artificiel découvert par Henri Becquerel en 1896 et rapidement confirmée par Pierre et Marie Curie, ce qui a été un événement majeur dans l'évolution des connaissances sur la structure de l'atome (**Caillot, 2002**).

La radioactivité est l'émission d'énergie et/ou de particules du noyau d'un atome instable, souvent après désintégration d'un proton ou d'un neutron dans ce noyau. L'unité de la radioactivité est le Becquerel, définie comme une désintégration par seconde, l'ancienne unité le Curie (1 Ci= $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq) est encore souvent citée (**Walto et al., 2005**).

II-2) Atome, isotope, les stables et les instables :

La nature est constituée depuis ses origines d'éléments stables et d'autres instables ou radioactifs, ce pendant, ces éléments qu'ils soient naturels ou artificiels émettent les mêmes rayonnements et ils décroissent selon les mêmes lois.

Les atomes sont constitués d'un noyau central renfermant Z protons et N neutrons. Autours de ce noyau gravitent des électrons, chargés négativement, ils sont près de 1936 fois plus légers que les nucléons (protons et neutrons). Il y a autant d'électrons qu'il y a de protons afin d'assurer l'équilibre électrique de l'ensemble.

$$\begin{aligned}
 Z + N &= A \quad \Longrightarrow \quad \text{Nombre de masse.} \\
 A - Z &= N \quad \Longrightarrow \quad \text{Nombre de Neutrons.}
 \end{aligned}$$

La plupart des couples ($Z ; N$) forment des structures **stables**, dans ce cas les forces nucléaires qui relient les nucléons entre eux sont fortes. D'autres couples forment des structures **instables** qui subissent en une ou plusieurs étapes des transformations avant de devenir des noyaux stables. Ce processus s'accompagne d'émissions de particules et/ou de rayonnements donnant naissance à d'autres éléments radioactifs ou non, ou dans un état excité avant de devenir stable (**Caillot, 2002**).

II-3) Bases théoriques sur le rayonnement :

Les rayonnements électromagnétiques ou corpusculaires ne sont jamais complètement arrêtés, mais ils sont atténués par leur passage dans la matière. Le facteur d'atténuation dépend de l'énergie de départ et de la nature de la matière, surtout de sa densité.

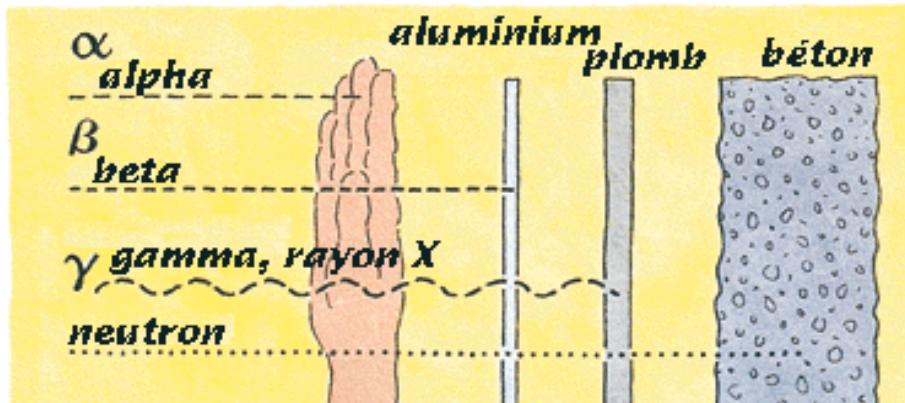


Figure 09 : Le pouvoir de pénétration des rayonnements.

Chaque radio-isotope est caractérisé par la nature du rayonnement qui est émis, l'énergie de ce rayonnement et sa demi-vie (Walto et al., 2005).

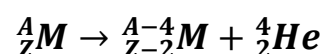
Les isotopes radioactifs se transforment plus ou moins rapidement en d'autres éléments stables ou instables en émettant des rayonnements ou des particules ayant une énergie, celle-ci s'exprime en électronvolt (eV), kilo électronvolts (keV) ou million d'électronvolts (MeV) (Caillot, 2002).

On distingue 3 types de rayonnements :

II-3-a) Rayonnement Alpha :

Le rayonnement alpha est un noyau d'Hélium, ayant une masse atomique de 4 et une charge de 2 ; facilement arrêté par une feuille de papier ou par des épaisseurs faibles de tissus vivants mous. Le rayonnement alpha est émis en général par les noyaux lourds comme l'uranium, thorium et le radon (Walto et al., 2005).

Un noyau radioactif se désintègre en donnant un rayonnement alpha. Il devient un autre noyau moins énergétique et plus stable, les lois de conservations d'énergies durant cette transformation sont conservées. La réaction nucléaire de cette transformation est la suivante :



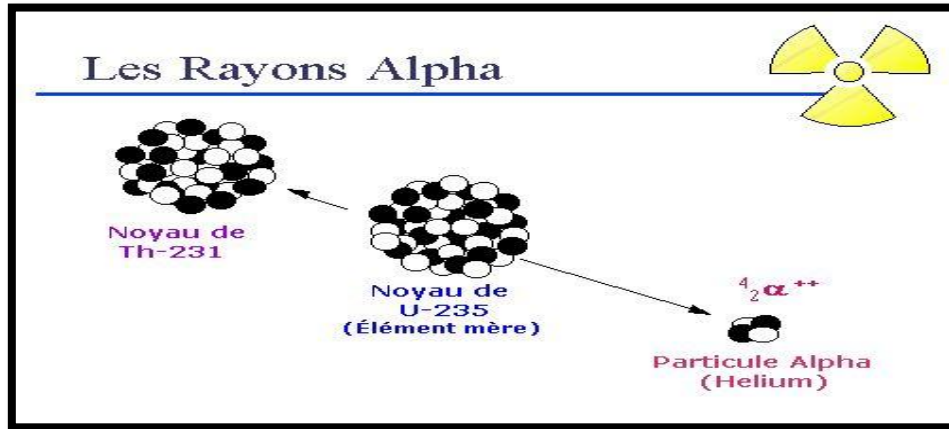


Figure 10 : Désintégration alpha d'un noyau lourd.

II-3-b) Rayonnements Beta et capture électronique:

Ce sont des électrons négatifs β^- ou positifs β^+ (les positrons), susceptibles de traverser quelques millimètres de peau mais stoppés par une mince couche ou plaque d'aluminium (Caillot, 2002).

- Désintégration β^+ :

Elle correspond à la désintégration d'un noyau avec émission d'un positron et d'un neutrino : elle est caractéristique des noyaux trop riches en protons (Belazreg, 2006).

L'équation-bilan de la désintégration β^+ est :

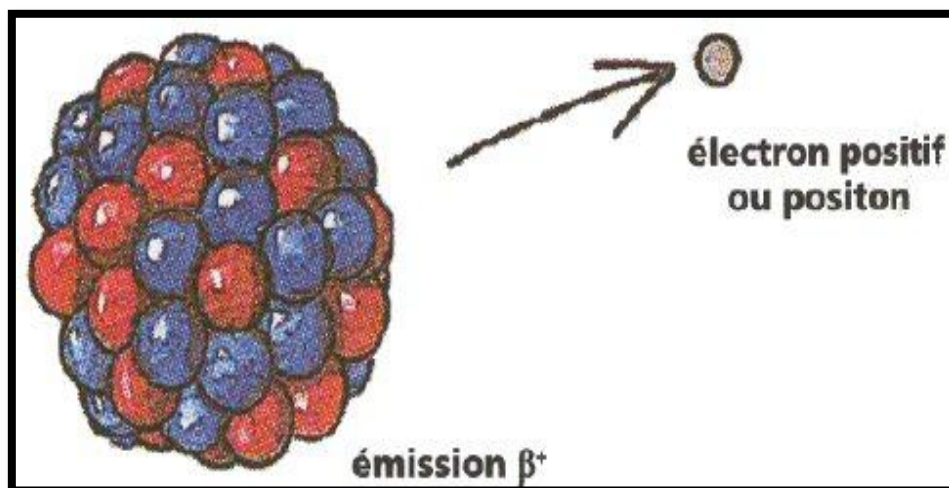
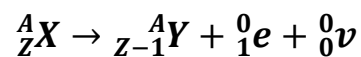


Figure 11 : Désintégration β^+

- **Désintégration β^- :**

Elle correspond à la désintégration d'un noyau avec émission d'un électron et d'une particule neutre de masse nulle, un antineutrino. La désintégration β^- est caractéristique des noyaux trop riches en neutrons (Belazreg, 2006).

L'équation-bilan de la désintégration β^- est :

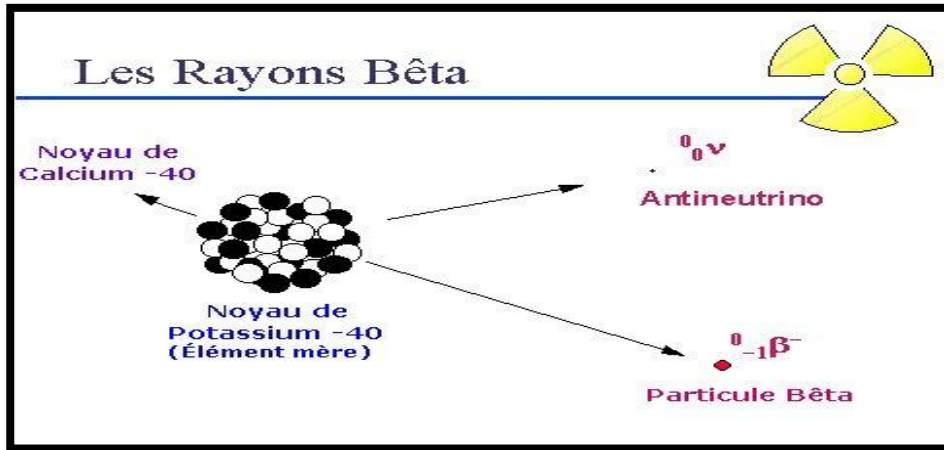
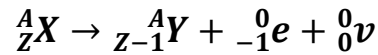


Figure 12 : Désintégration β^-

- **Capture électronique :**

Le déficit neutronique est comblé par la capture d'un électron proche du noyau, donc de la couche K, par un proton. Le nombre de masse du nucléide formé reste inchangé ($A=0$) et son numéro atomique diminue de une unité ($Z=1$).

La réaction globale s'écrit (Maalem, 1998) :

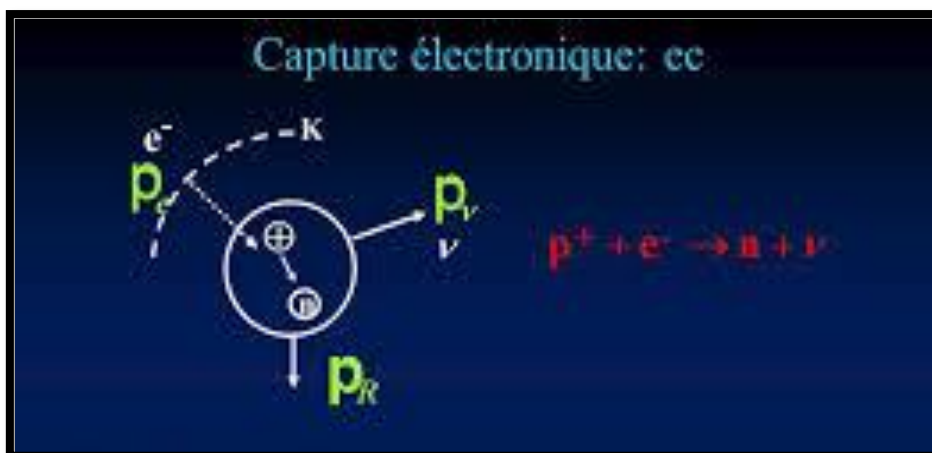
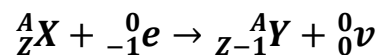


Figure 13 : Capture électronique

II-3-c) Rayonnement gamma :

Des photons γ sont émis lorsque le noyau fils obtenu dans un état excité passe à un autre état moins excité ou à l'état fondamental. Les photons émis sont énergétiques et leurs énergies sont quantifiées : ils présentent un spectre d'émission discontinu.

L'émission gamma accompagne généralement les radioactivités β^- , β^+ , α (Belazreg, 2006).

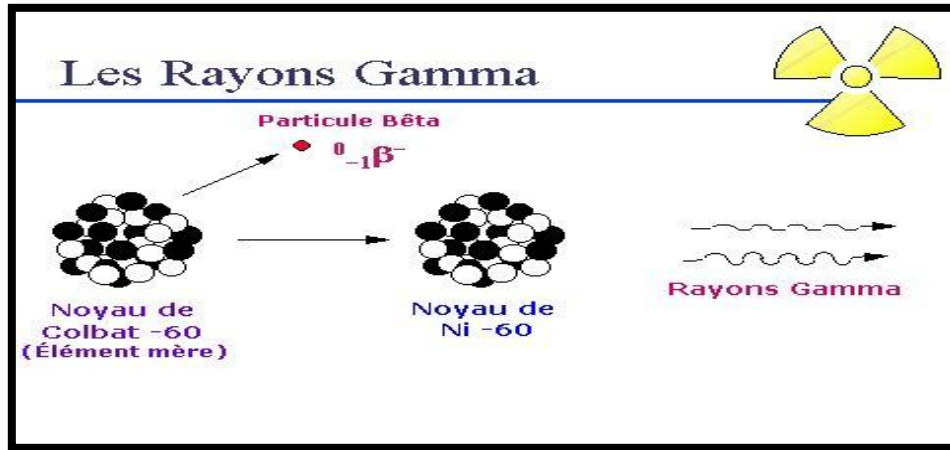


Figure 14 : Émission gamma.

II-4) Lois de désintégrations :

II-4-1) Activité :

L'intensité ou la « puissance » d'une source radioactive se caractérise par le nombre de désintégration qui se produisent chaque seconde, son unité est le **Becquerel (Bq)**.

L'activité d'un radioélément décroît dans le temps suivant une loi exponentielle :

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (01)$$

Avec :

A : activité de la source à l'instant t;

A₀ : activité initiale de la source;

λ : constante de désintégration du radioélément.

II-4-2) période radioactive :

C'est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes radioactifs présents à un instant donné disparaissent. Ce qui s'écrit : $A = A_0/2$ d'où :

$$T = \ln 2 / \lambda. \quad (02)$$

Avec :

T : période radioactive.

II-4-3) Vie moyenne :

C'est la durée de vie moyenne des isotopes radioactifs.

$$\tau = 1/\lambda \text{ e} \quad (03)$$

II-5) Traceurs radioactifs dans le sol :

La plupart des radionucléides sont l'héritage terrestre de la synthèse nucléaire originelle du système solaire. Ceux qu'on rencontre encore aujourd'hui sont les survivants de cette synthèse du simple fait que leur période radioactive est de l'ordre de grandeur de l'âge de la terre. Ces radionucléides sont dits : **primordiaux**.

Outre les radionucléides primordiaux, il existe dans notre environnement les radionucléides **cosmogéniques**, créés par le rayonnement cosmique et les radionucléides **anthropiques** ou artificiels créés par l'homme (**Le petit et al., 2002**).

Les sols contiennent des radio-isotopes naturels ou à la suite de diverses contaminations. La composition physique et chimique des sols détermine leur capacité à limiter la mobilité des radio-isotopes. La mobilité qui détermine à son tour leur transfert du sol à la plante. A l'inverse, lors d'une contamination en surface du sol, plus la mobilité est importante, plus vite et plus loin les radio-isotopes seront entraînés verticalement limitant ainsi l'exposition extrême à la surface du sol et le risque de consommation ou d'inhalation du sol (animaux, homme) (**Walto et al., 2005**).

L'utilisation des marqueurs persistants peut apparaître comme un comportement efficace par rapport aux méthodes conventionnelles. Parmi les divers isotopes qui ont été suggérés comme traceurs du processus d'érosion, le césium-137 s'avère particulièrement intéressant (**Bernard et al., 1998**).

II-6) Le césium- 137 (¹³⁷Cs) :

Le césium est l'élément le plus étudié en radio-écologie. Dans les écosystèmes terrestres, le sol joue un rôle principal pour le devenir du césium (**Colle et al., 2005**).

II-6-1) Définition du césium-137 :

Le césium a été découvert en 1860 dans l'eau minérale de Durkheim en Allemagne, par Robert Wilhelm Bunsen et Gustave Robert Kirchhoff, par spectroscopie d'émission de sa raie bleue à laquelle il doit son nom tiré du latin *caesium*, bleu du ciel (**Menager et al., 2009**).

Comme le lithium, sodium, potassium et le rubidium, le césium appartient à la famille des alcalins. Il possède 3 isotopes dont la masse varie de 114 à 145 ; parmi eux seul l'isotope 133 est stable et il existe naturellement.

Le césium-137 émetteur de β^- donne naissance au baryum 137 excité, la désexcitation de ce dernier donne du baryum stable avec une émission gamma d'énergie 661.7 keV (Colle et al., 2005).

Tableau 02: Principales caractéristiques du ^{137}Cs .

Elément	^{137}Cs
Période radioactive	30 ans
Activité massique	$3,22 \cdot 10^{12} \text{ Bq.g}^{-1}$
Émission principale	β^-
par désintégration	$E_{\text{max}} = 512 \text{ keV (94,6 \%)}$
Rendement d'émission %	$E_{\text{max}} = 1\,117 \text{ keV (5,4 \%)}$

II-6-2) Origine du césium:

Le césium est dispersé dans les roches, les sols, les argiles et dans l'eau de mer. L'isotope stable ^{133}Cs existe dans l'environnement à des concentrations, allant de 0.3 à 25 $\mu\text{g/g}$ (poids sec) dans les sols, $8 \cdot 10^{-5}$ à 90 $\mu\text{g/g}$ dans les végétaux terrestres, et dans l'eau de mer sa concentration est de 0.3 à 0.5 $\mu\text{g/l}$.

Le développement des activités industrielles et militaires utilisant des matières nucléaires a conduit à la libération volontaire ou accidentelle dans l'environnement de nombreux radionucléides, parmi eux, le ^{137}Cs . Ce dernier doit être considéré avec beaucoup d'attention en raison de sa période radioactive longue 30 ans, du rayonnement gamma de haute énergie émis (Menager et al., 2009).

Le césium 137 provient de la fission de l'uranium 235, l'uranium 238 et autres matières fissibles. Il est dérivé de précurseurs gazeux selon la réaction suivante :



Le $^{137*}\text{Ba}$ (forme métastable) formé à partir du ^{137}Cs a une demi-vie de 2.57 minutes et produit du ^{137}Ba stable avec émission d'un rayonnement γ d'une énergie de 0.662 MeV, c'est ce rayonnement que l'on mesure et qui sert à quantifier le ^{137}Cs . Le précurseur du ^{137}Cs est donc l' ^{137}I et le produit terminal de la chaîne de désintégration est le ^{137}Ba (Bernard, 1998).

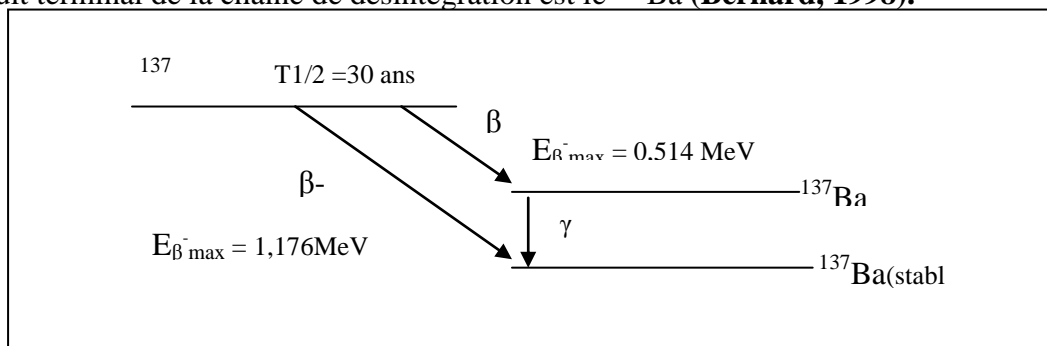


Figure 15 : Schéma de désintégration du césium-137.

II-6-3) Comportement environnemental du césium-137 :

Le ^{137}Cs retombe au sol, avec les précipitations. Il est rapidement et fortement adsorbé par les particules de celui-ci, en particulier par les fractions fines. Le complexe argilo-humique adsorbe en effet très fortement le ^{137}Cs .

Les retombées directes du ^{137}Cs sur les végétaux peuvent être adsorbées et absorbées. La partie du Cs-137 adsorbée est généralement lessivée par les précipitations et retourne ainsi au sol, celle absorbée est libérée dans le sol lorsque la végétation meurt et s'y décompose (**Bernard et al., 1998**).

II-6-4) Le césium et l'érosion des sols :

La croûte terrestre contient en moyenne 3g de césium par tonne métrique. Il existe de manière dispersée dans les roches, les sols et les argiles.

Du fait de leurs propriétés physico-chimiques très proches, le Cs et le Rb (rubidium) présentent une répartition similaire dans les roches en silice et en lithium.

Concernant le césium radioactif, les activités mesurées dans les couches supérieures des sols et des sédiments sont généralement de l'ordre d'une dizaine de Bq/kg. Le tableau 03 représente les coefficients de distribution de Cs-137 dans le milieu terrestre (**Menager et al., 2009**).

Tableau 03 : coefficient de Cs137 dans le milieu terrestre.

Coefficient de distribution en Bq/kg de sol sec	
Sol sableux	$2.7 \cdot 10^2$
Sol argileux	$1.8 \cdot 10^3$
Sol limoneux	$4.4 \cdot 10^3$
Sol organique (30% de matière organique)	$2.7 \cdot 10^2$

La capacité des sols à retenir les radio-isotopes, limite non seulement leur entrée dans les systèmes biologiques terrestres, mais protège également les milieux aquatiques. L'arrachement et le déplacement de particules de terre sur lesquelles des radio-isotopes sont adsorbés dispersent aussi ces mêmes sources de radioactivité (**Walto et al., 2005**).

Le ^{137}Cs est particulièrement bien adapté pour des études sur l'érosion pour de multiples raisons :

- Une fois retombé au sol, l'élément est fixé aux particules fines de celui-ci. Il n'est que très peu prélevé par les cultures ou bio-accumulé par les producteurs. Sa redistribution spatiale dans l'environnement reflète donc les mouvements de sol ;
- Les retombées de cet isotope étant universelles, cette technique est utilisable partout et permet de quantifier les phénomènes érosifs à des échelles spatiales très différentes (parcelle, champ, bassin versant) ;

- Après une demi-vie de 30 années, le ^{137}Cs sera encore longtemps présent dans les sols et facilement détectable ;
- les mesures de Cs-137 renseignent non seulement sur l'érosion nette, mais sur l'ensemble des mouvements de sol, leur importance relative et leur distribution spatiale dans le paysage ;
- un seul échantillonnage de sols de la zone étudiée est suffisant pour pouvoir y estimer l'ensemble des mouvements de sol en cours depuis plus de 30 ans
(Bernard *et al.*, 1998).

II-6-5) Principe de la technique de césium-137 :

Pour pouvoir estimer les mouvements des sols à partir des mesures de ^{137}Cs , il faut mesurer le stock de césium présent dans les sols, tant pour les sites d'étude (zone d'érosion ou de dépôt) que pour le site de référence non érodé. En milieu non perturbé, le ^{137}Cs est habituellement concentré dans les premiers centimètres du sol et décroît de façon exponentielle avec la profondeur.

Après mesure des activités, on compare l'activité spécifique en ^{137}Cs du site étudié à celle du site témoin non érodé (Bernard *et al.*, 1998).

La Figure 16, illustre le principe de redistribution du ^{137}Cs dans le sol pour la quantification d'érosion et de sédimentation.

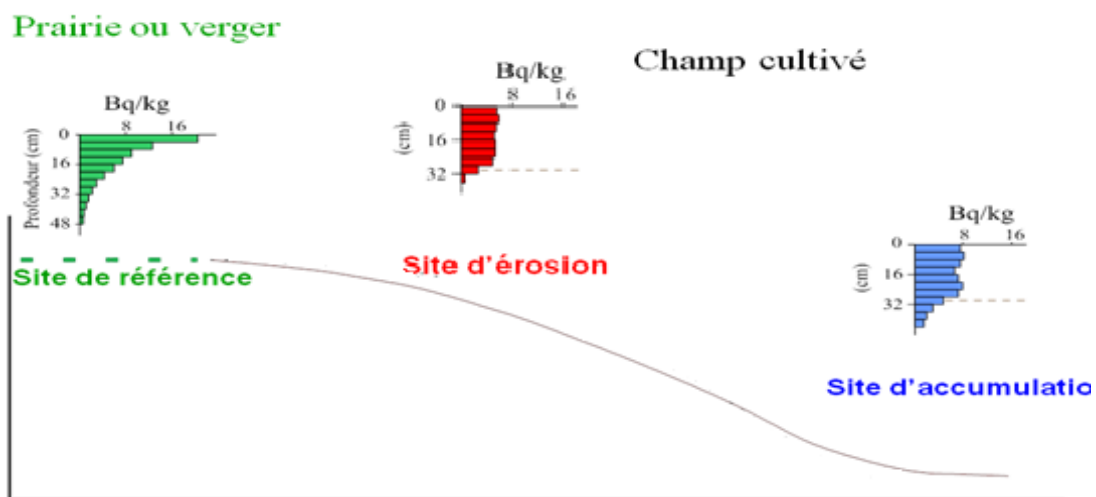


Figure 16: Principe de redistribution du ^{137}Cs dans le sol.

II-7) Spectrométrie gamma :

La spectrométrie gamma est une technique d'analyse nucléaire non destructive. Ses caractères rapides, multi élémentaires lui permettent d'être largement utilisée dans le domaine biologique, géologique et environnemental sans traitement de l'échantillon (Le petit *et al.*, 2002).

II-7-1) Principe de la technique :

Le principe de la spectrométrie gamma est basé sur la détection des rayons γ émis par les radionucléides à travers leurs interactions avec la matière du détecteur, générant ainsi la production d'un signal électrique.

Elle permet de réaliser une analyse quantitative et qualitative des éléments radioactifs présents dans l'échantillon selon le but recherché.

- L'analyse qualitative repose principalement sur l'identification des radioéléments présents dans l'échantillon, ceci est possible grâce à la mesure de l'énergie du rayonnement gamma émis par le radioélément ;
- L'analyse quantitative permet en plus de l'identification des radioéléments, la détermination de l'activité spécifique, qui est basée sur l'intensité de l'émission du rayonnement gamma de chaque radioélément (Azbouche, 2012).

II-7-2) Description de la chaîne de spectrométrie gamma :

La chaîne de mesure est constituée de :

II-7-2-a) Détecteur à semi-conducteur :

Un détecteur germanium hyper pur est caractérisé par sa haute résolution en énergie, celui-ci est maintenu à la température de l'azote liquide.

Le détecteur est entouré par un château blindé de plomb d'une épaisseur de 11,4 cm ; il convient à noter que le blindage en Pb lui-même constitue une source de production de rayonnements secondaires sous l'impact du rayonnement cosmique, et pour cela un écran interne de grande pureté est utilisé il s'agit d'une association Sn/Cu (3 mm d'Etain, 1.5 mm de cuivre).

Le château de plomb permet de minimiser la contribution du bruit de fond dans le spectre de l'échantillon à analyser.

II-7-2-b) Chaîne de mesure associée :

Elle est constituée d'un préamplificateur placé à proximité du cristal de germanium (incorporé), il joue le rôle de couplage optimale de l'impulsion entre le détecteur et l'amplificateur ; cette dernière sera portée jusqu'à l'amplificateur pour être ajustée et amplifiée.

Après l'amplification, l'ADC (convertisseur analogique digital), se charge de convertir l'impulsion en une valeur numérique qui sera stockée dans l'analyseur multi-canal, ce dernier permet de classer et totaliser le nombre de photons émis en fonction de leurs énergies. La figure suivante, illustre le détecteur et le système d'acquisition de la technique de spectrométrie gamma.

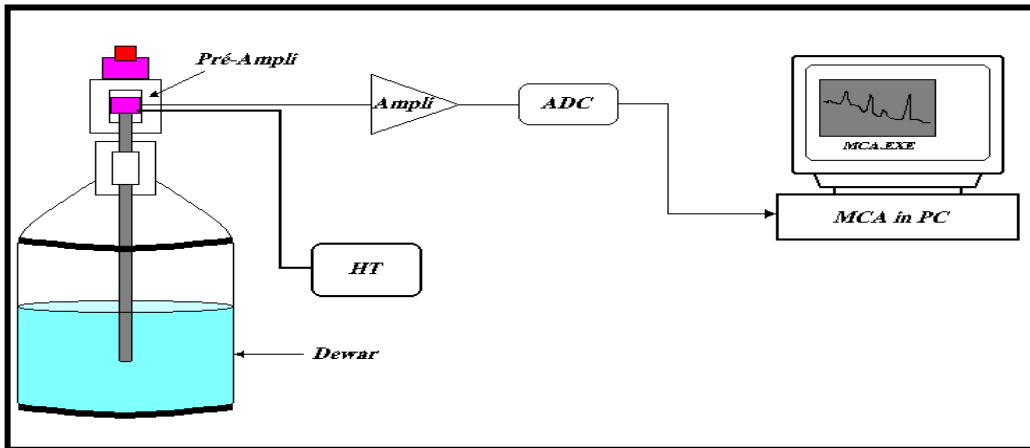


Figure 17 : Dispositif expérimental de la spectrométrie gamma.

Au niveau du système d'acquisition s'élabore le spectre qui sera ensuite analysé. Le spectre obtenu est traité par un logiciel de déconvolution des spectres gammas.

Actuellement, le système d'acquisition modulaire est remplacé par un système hardware DSA (Desk Spectrometry Analysis) (figure 18) qui remplace la fonctionnalité de l'alimentation, l'amplificateur, et l'ADC (Azbouche, 2014).

Ce système est géré par un logiciel informatique appelé Génie 2000 qui assure les fonctions suivantes :

- La gestion des acquisitions ;
- La mesure des paramètres de la chaîne de spectrométrie (résolution, énergie, rendement) ;
- La localisation des pics d'absorption totale ;
- Le calcul des énergies et de la surface de chaque pic ;
- La prise en compte de facteurs correctifs spécifiques à une mesure donnée (décroissance depuis le prélèvement, décroissance durant le temps de comptage, correction d'auto atténuation, correction de sommation).

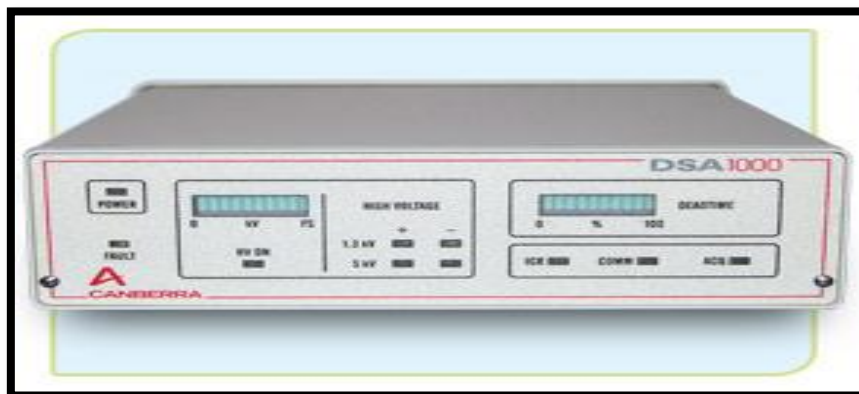


Figure 18 : DSA 1000.

Avant l'exécution du plan d'échantillonnage sur le terrain, il est important de faire une enquête préliminaire, ceci en rassemblant les différentes informations et données pouvant retracer l'histoire du terrain, ce qui apportera une aide précieuse pour le travail, car il permettra de fixer les mesures à prendre pour garantir une bonne qualité de prélèvement.

III- Description de la région d'étude « forêt de Bainem » :

III-1) Localisation géographique :

La forêt de Bainem est localisée sur la chaîne montagneuse de moyenne altitude au nord ouest de la wilaya d'Alger, au niveau du massif de Bouzareah, qui domine le littoral algérois ouest. Ses coordonnées géographiques sont : 3°, 02' Est et 36°, 49' Nord. L'altitude moyenne varie entre 60m et 285m, la topographie est assez accidentée notamment sur le versant nord qui domine la bande littorale ; la partie centrale présente un relief moins accidenté (INRF, 2015).



Figure 19 : localisation de la forêt de Bainem.



Figure 20 : localisation de la zone d'étude.

III-2) Historique :

L'origine de la forêt de Bainem remonte à 1851, la forêt qui appartenait à des particuliers a fait l'objet d'une loi pour la création d'une réserve forestière destinée à satisfaire les besoins de la population algéroise en bois de chauffage.

En 1922, un premier arboretum a été créé sur une superficie de 50 ha, pour des essais sur l'introduction de différentes espèces d'Eucalyptus ; entre 1868 et 1956, la forêt a connu une succession d'incendies, plus de 41 sinistres ont été recensés, en 1956 toute la forêt est ravagée par le feu.

Dès 1958, un programme de réhabilitation est mis en place avec l'implantation d'un réseau de banquettes, de défense et de restauration des sols (DRS), le lancement des plantations a débuté en 1960.

A l'indépendance, la forêt domaniale de Bainem est intégrée au domaine forestier national, le secteur poursuit la gestion et le développement du patrimoine avec l'entretien des plantations et l'installation en 1965 d'un arboretum de 81 parcelles. En 1984, le parc national de Bainem est créé par le décret du 11 février 1984, des aménagements récréatifs ont été réalisés.

En 1997, compte tenu de la situation sécuritaire qui primait, des coupes et des défrichements ont été réalisés dans toute la forêt, les activités récréatives ont été totalement abandonnées et les travaux d'entretien se sont arrêtés. Ce n'est qu'à partir de 1998, avec l'arrêt des coupes sécuritaires que des actions de réhabilitation ont été entamées pour reconstituer le patrimoine forestier et relancer les activités récréatives.

Entre l'an 2000 et l'an 2005, un important programme a été lancé pour réhabiliter la forêt et relancer les différentes activités récréatives ; ces efforts ont permis de reconstituer le cadre général de la forêt. Aujourd'hui elle est dans son ensemble bien entretenue. (INRF, 2015).

III-3) Aspect géologique, pédologique et hydrologique de la forêt :

La forêt de Bainem repose sur des terrains sédimentaires et métamorphiques ; les roches métamorphiques sont dominantes et sont représentées par des schistes, des micaschistes, gneiss, des calcaires et des quartzites.

Plusieurs oueds prennent naissance dans le massif de Bainem, mais la plupart sont intermittents et ne coulent pas toute l'année à cause du régime des pluies. L'implantation importante des Eucalyptus (*E.camadulensis*, *E.gomphocephala*, *E.cladocalyx* et *E.leucoxydon*) sur le site est un excellent moyen de juguler et de freiner la force des eaux de ruissellement.

Les principaux oueds sont : oued de Bainem d'une longueur de 1.15 km et oued Afron d'une longueur de 1.97 km. Les autres cours d'eau sont oued Djerdah, oued Melah, oued Dratguiss et oued Beni messous d'une longueur de 2.86 km (INRF, 2015).

III-4) L'occupation du sol :

III-4-1) La forêt :

La végétation naturelle de la forêt de Bainem a été complètement modifiée suite aux différents incendies, coupes, et reboisements effectués le plus souvent avec des essences exotiques.

La végétation originelle de la forêt, correspond à l'oléo-lenticetum. Des vestiges d'une ancienne forêt de chêne liège subsistent encore dans certains endroits du versant nord de la forêt, sur les parcelles les plus escarpées ; ce sont les résineux (Pin d'Alep, Pin Maritime) et divers espèces d'Eucalyptus qui constituent les principales essences de la forêt (INRF, 2015).

III-4-2) Les peuplements forestiers :

La composition de la forêt de Bainem est caractérisée par un grand mélange d'essences forestières, c'est une véritable mosaïque.

III-4-2-a) Les Eucalyptus :

C'est la principale essence forestière, son implantation est ancienne, l'Eucalyptus s'est maintenu, son état général est bon malgré les problèmes que la forêt a connu pendant les années 1990. Prés de 5 variétés différentes ont été implantées citons : *E.camadulensis*, *E.gomphocephala*, *E.cladocalyx* et *E.leucoxydon*.

C'est surtout l'*Eucalyptus gomphocephala* qui domine, c'est l'espèce la plus utilisée. On observe surtout le taillis, c'est la conséquence des coupes et des reprises qui n'ont pas été suivies donnant un développement important des arbres. Pour une forêt de détente, il serait intéressant de faire évoluer les taillis en futaies par le recépage (INRF, 2015).

III-4-2-b) Les peuplements en mélanges :

Il s'agit le plus souvent de 2 à 3 essences qui se partagent la même sous parcelle, le plus souvent on distingue le chêne liège et différents types de Pin (Alep, Maritime, Pignon) avec le cyprès.

Les peuplements en mélange sont surtout issus de reboisements, de repeuplements sur des parcelles où existaient déjà des peuplements touchés par les feux de forêts, ils sont généralement denses à moyennement denses (INRF, 2015).

III-4-2-c) Les peuplements de Pin d'Alep :

Généralement issus des anciens reboisements, les peuplements de Pin d'Alep ne sont pas très importants, la densité des peuplements est dense à moyennement dense (INRF, 2015).

III-4-2-d) Les peuplements de chêne liège :

Il n'existe qu'un seul peuplement homogène bien que le chêne liège soit le peuplement initial de la forêt. Le peuplement de chêne liège est au stade de jeune futaie (INRF, 2015).

III-4-2-e) Les reboisements :

Ils sont importants et ont été généralement réalisés avec des espèces de Pin (Pin Maritime, Pin Pignon). Les reboisements ont également concerné des associations d'espèces notamment le Cyprès. La densité est moyenne à claire.

Il faut relever qu'un seul reboisement a concerné le chêne liège sur 29 ha, les reboisements tendent à favoriser la dominance des résineux dans la forêt (INRF, 2015).

III-5) Étude climatique :

Lorsqu'on étudie le climat d'une région, on effectue généralement la moyenne pendant 20 ou 30 ans des températures, des précipitations parfois on cite le vent dominant ou la pression moyenne (Escourrou, 1978).

Des données d'observations couvrant une courte période n'ont généralement aucune valeur démonstrative. La variabilité des éléments du temps est telle, d'une saison ou d'une année à une autre, qu'il est nécessaire de disposer de séries d'observations prolongées pour pouvoir en tirer des indications climatiques variables. Cela est indispensable non seulement pour connaître les traits moyens d'un climat mais aussi pour apprécier les risques de renouvellement d'une situations donnée : par exemple les probabilités de gelées printanières, les risques de longues périodes sèches ou humides (Estienne et al., 1970).

III-5-1) Caractéristiques bioclimatiques :

Le développement de la végétation est intimement lié aux conditions bioclimatiques locales, les deux facteurs qui ont le plus d'influence sont les précipitations et les températures, néanmoins d'autres facteurs climatiques secondaires tels que la gelée peuvent constituer un facteur limitant pour l'installation de certaines espèces sensibles.

III-5-2) Données climatiques :

Pour être utilisable tant par le météorologiste que par le climatologue, les observations doivent être aussi exactes que possible et comparables les unes aux autres, donc synchrones et faites dans les mêmes conditions (**Estienne en al., 1970**).

Pour notre étude, on a eu recours à l'usage des données climatiques issues de la station météorologique de DAR-EL-BEIDA (Alger) puisque sa localisation est proche de la zone d'étude et la disponibilité des données sont suffisantes.

Tableau 04 : Localisation de la zone d'étude par rapport à la station météorologique de DAR-EL-BEIDA selon les données géographiques.

Site	coordonnées	
	Latitude	Longitude
Zone d'étude (forêt de Bainem)	36°48 N	003°02 E
Station DAR-EL-BEIDA (Alger)	36°41 N	003°13 E

III-5-2-a) Précipitation:

Les pluies en Algérie se répartissent d'une manière irrégulière tout le long de l'année. Trois lois régissent cette distribution (Seltez, 1946) in (**Ait Aider et Allileche, 1993**).

- Elles augmentent avec l'altitude ;
- Elles sont plus élevées aux versants exposés aux vents humides ;
- Elles augmentent d'Ouest en Est, et diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral.

À l'aide du tableau 05 nous avons établi le graphique de la figure 21 qui met en évidence deux périodes pluviométriques bien distinctes :

- Une période humide et relativement froide, l'intervalle des précipitations se concentre entre le mois d'Octobre et le mois d'Avril.
- Une période sèche et chaude s'étendant du mois de juin jusqu'au mois de septembre.

La tranche pluviométrique moyenne annuelle enregistrée par l’O.N.M sur une période d’observation de 12ans (1996-2008) est de 607.0 mm.

Tableau 05: Cumuls mensuels des précipitations (mm) (O.N.M, 2008).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuelle
Moyenne	76.2	75.6	47.8	55.5	48.9	4.9	2.6	10.7	26.8	52.1	107.4	98.5	607.0

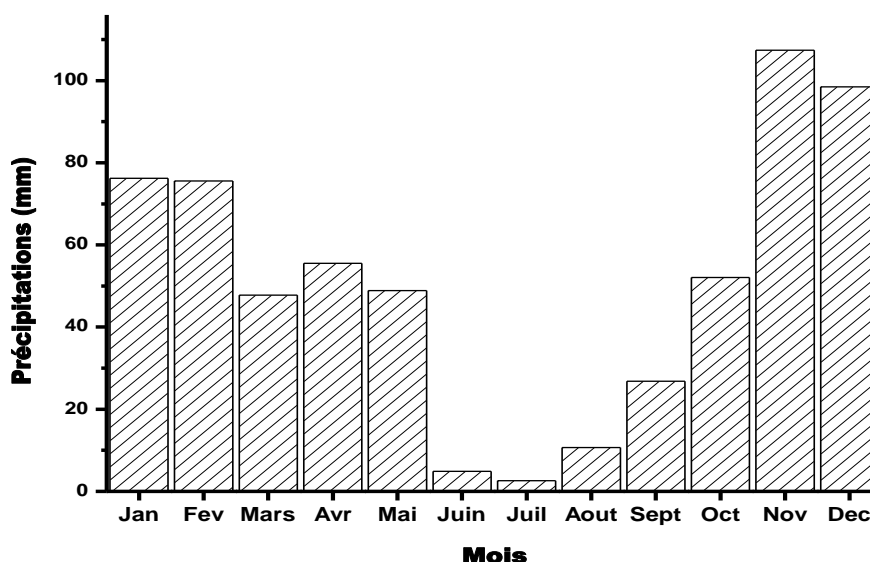


Figure 21 : cumuls mensuels des précipitations (mm) enregistrés à la station météorologique DAR EL BAIDA (1996-2008).

III-5-2-b) Température :

Selon le lieu, le mois, le jour et l’heure les températures varient. On distingue deux types de facteurs qui expliquent ces modifications :

- Ceux qui déterminent des changements d’un lieu à l’autre : latitude, altitude, sol.
- Ceux qui expliquent les variations d’un moment à l’autre dans une même station : saison, neige, nébulosité, mobilité de l’air (Escourrou, 1978).

Tableau 06 : Moyenne mensuelle des températures moyennes (°C) (O.N.M, 2008)

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuelle
Les minima	5.5	5.3	7.1	9.3	12.9	16.4	19.1	20.1	17.7	14.4	9.7	6.9	12.1
Les maxima	17.3	17.5	20.0	22.0	25.0	29.2	31.7	32.6	29.7	26.5	20.7	17.7	24.2
Moyenne	11.4	11.4	13.6	15.7	18.9	22.8	25.4	26.3	23.7	20.5	15.2	12.3	18.1

À l'aide du tableau 06, nous avons établi le graphique de la figure 22, qui met en évidence les variations de la température mensuelle.

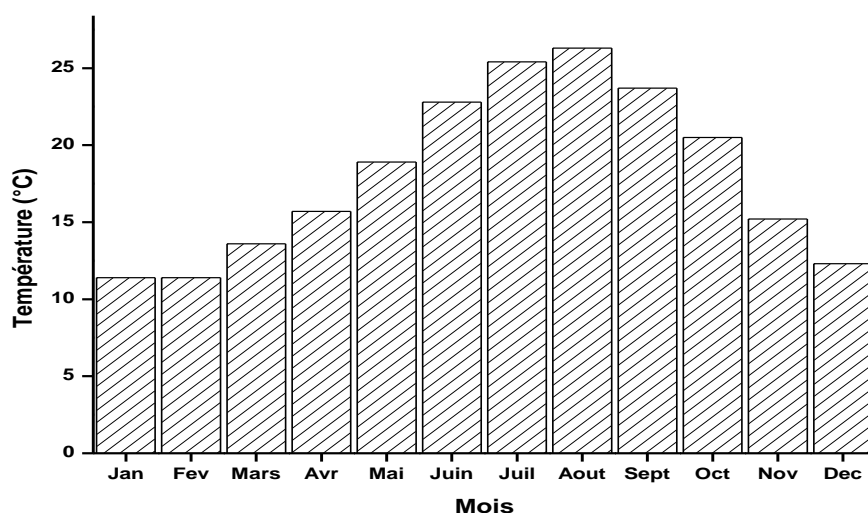


Figure 22 : Température moyenne mensuelle (°C) enregistrée à la station météorologique DAR EL BAIDA (1996-2008).

L'analyse du tableau 06 ainsi que la lecture de la figure 22, montrent que la température moyenne maximale est de 32.6°C, elle correspond au mois d'Août, qui représente le mois le plus chaud de l'année, alors que la température moyenne minimale est de 5.3°C qui correspond au mois de Février, le mois le plus froid de l'année.

III-5-2-c) Vent :

Tableau 07: Moyenne mensuelle des vitesses du vent moyen en (m/s) (O.N.M, 2008).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	annuelle
Moyenne	2.3	2.3	2.4	2.7	2.7	2.8	2.8	2.5	2.4	2.0	2.4	2.4	2.5

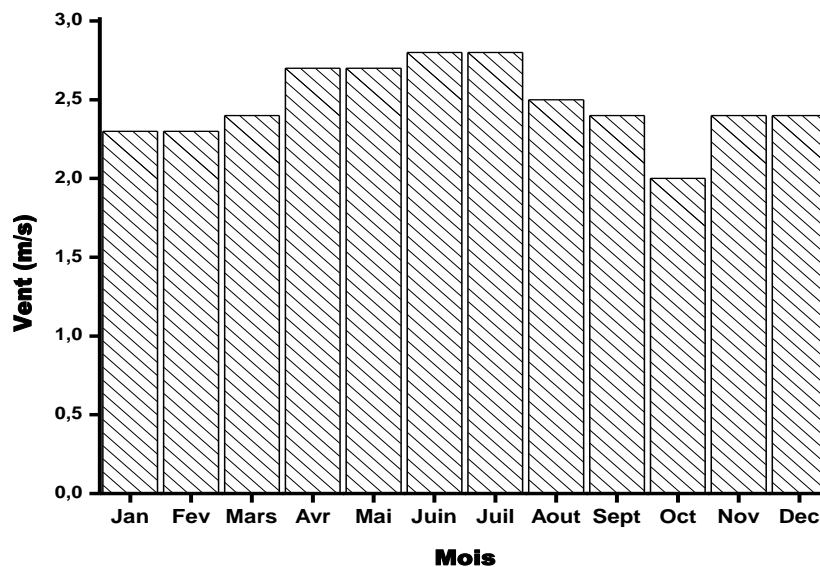


Figure 23 : moyenne mensuelle des vitesses du vent moyen (m/s) enregistrée par la station météorologique DAR EL BAIDA (1996-2008).

L'analyse du tableau 07 ainsi que la lecture de la figure 23, montrent que les vents soufflent durant toute l'année à une vitesse qui varie entre 2 à 2.8 m/s, et une intensité faible.

III-5-3) Synthèse climatique :

Pour rendre les données climatiques plus significatives, plusieurs auteurs ont proposé des indices climatiques qui sont des combinaisons des moyennes des différentes composantes du climat notamment la température et les précipitations (Emberger, 1955).

- **Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN :**

Pour connaître la durée de la période sèche, Bagnouls et Gausсен ont établi un diagramme dit ombrothermique (figure 24) où figure en abscisses les mois, en ordonnées à gauche, les précipitations mensuelles P (mm) et à droite les températures moyennes mensuelles T (°C) avec une échelle double à celle des précipitations.

Selon ces deux auteurs une période est considérée sèche lorsque le total des précipitations P (mm) est inférieur ou égale au double du total des températures :

$$T (°C) \quad P \leq 2T$$

Avec :

P : précipitations mensuelles (mm) ;

T : températures moyennes mensuelles (°C).

La période sèche est nettement distinguée sur le graphique lorsque la courbe des précipitations se situe au dessous de celle des températures et l'autre partie du graphique correspond à la période humide.

Le tableau 08, nous donne les précipitations et les températures moyennes mensuelles.

Le tableau 08 : les précipitations et les températures moyennes mensuelles.

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Température T (°C)	11.4	11.4	13.6	15.7	18.9	22.8	25.4	26.3	23.7	20.5	15.2	12.3
Précipitation P (mm)	76.2	75.6	47.8	55.5	48.9	4.9	2.6	10.7	26.8	52.1	107.4	98.5

De ce tableau résulte le diagramme ombrothermique.

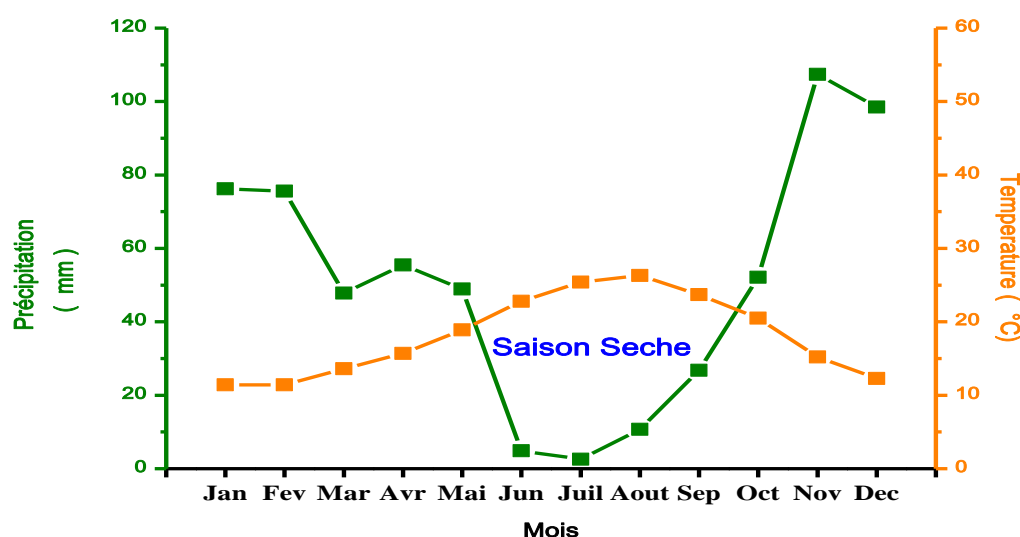


Figure 24: Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN

Le diagramme ombrothermique montre une période sèche d'environ 04 mois, elle débute de la mi-mai jusqu'à la fin du mois de septembre avec un pic en mois d'août.

- **Le quotient pluviométrique et climagramme d'EMBERGER :**

Les recherches d'Emberger au Maroc, puis en France et dans l'ensemble de la région méditerranéenne l'ont amené à définir les différents étages bioclimatiques en fonction du coefficient pluviométrique (Q_2) qu'il a mis au point ; cet indice est fondé sur les critères liés aux précipitations annuelles moyennes (P en mm), à la moyenne des minima du mois le plus froid de l'année (m) et à la moyenne des maxima du mois le plus chaud (M), selon la formule :

$$Q_2 = 2000 P / (M^2 - m^2) \quad (04)$$

Où :

P: précipitations moyennes annuelles (mm) ;

M : température maximale du mois le plus chaud ;

m : température minimale du mois le plus froid.

M et m sont en degrés absolus ($t^{\circ}K = t^{\circ}C + 273.2$).

Ces valeurs peuvent être organisées en un graphique orthonormé, le climagramme d'Emberger où l'indice Q_2 caractérisant le degré d'humidité globale du climat est en ordonnées et m en abscisses (figure 25) (Quézel et al., 2003).

Après calculs, le quotient pluviométrique classe la forêt de Bainem sur l'étage bioclimatique subhumide à variante chaude avec un coefficient $Q_2 = 76,10$.

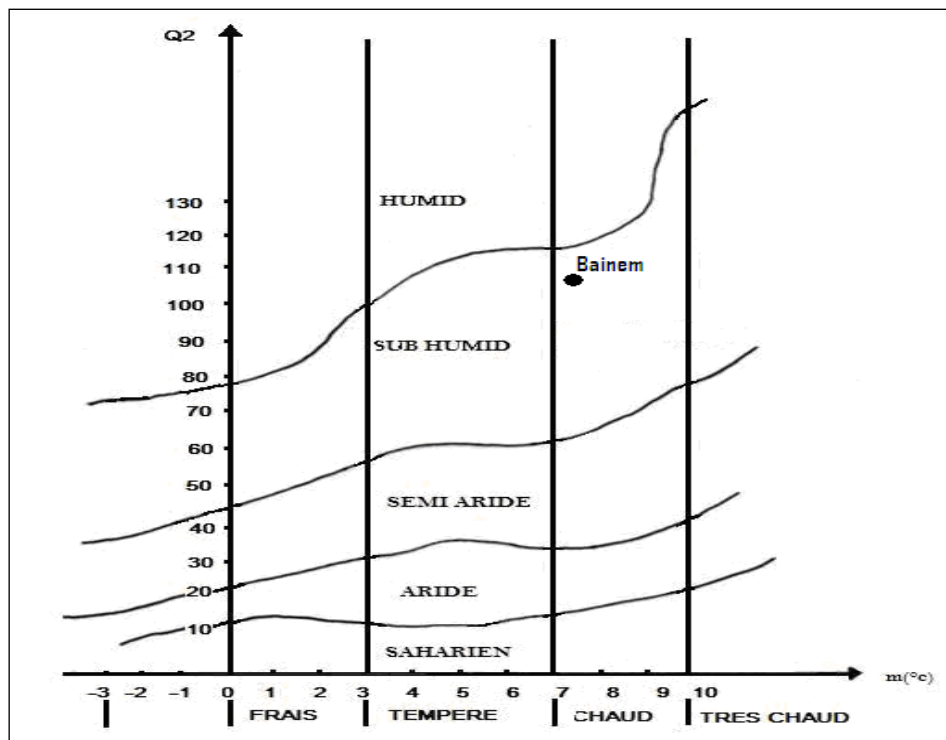


Figure 25 : Situation de la forêt domaniale de Bainem sur le climagramme d'EMBERGER.

IV-1) Échantillonnage :

L'objet de l'échantillonnage est la définition de conditions de travail qui permettent d'obtenir des échantillons représentatifs du phénomène étudié, à la fois dans l'espace et dans le temps.

Dans le temps, il faudra choisir le moment idéal pour échantillonner, la durée de la campagne de mesure, il faudra aussi opter pour la continuité ou non des prélèvements et pour une éventuelle synchronisation des prélèvements effectués en différents endroits.

Le prélèvement des échantillons fera appel à des techniques particulières et des instrumentations spécifiques, qui peuvent conditionner les résultats finaux. Il nécessitera également un soin particulier que seul un opérateur averti pourra assurer.

Enfin, se poseront les derniers problèmes de cette phase d'échantillonnage : la conservation, puis le transport des échantillons jusqu'au laboratoire, et la synchronisation des opérations d'échantillonnage et d'analyse (Nicolas *et al.*, 1997).

IV-1-1) Matériel utilisé :

L'exécution du plan d'échantillonnage s'est fait à l'aide de différents instruments : décamètre, corde, quadrant métallique, marteau, piochon, raclette, sachets libellés. La figure ci-dessous montre le matériel utilisé sur le terrain.



Figure 26 : Instruments d'échantillonnage (Khireche, 2015).

IV-1-2) Échantillonnage sur le site d'étude :

Deux considérations doivent toujours être présentes à l'esprit :

- L'échantillonnage sur le terrain est une phase essentielle, car la variabilité du terrain est considérable, l'erreur d'échantillonnage peut hypothéquer la représentativité de l'échantillon prélevé.
- Dans la majorité des cas les prélèvements ne sont pas effectués de manière aléatoire ou systématique, mais choisis le mieux possible en fonction de connaissances ou de tests de terrain, de manière assez arbitraire (**Pansu et al., 1998**).

L'échantillonnage du sol a été effectué au niveau de la forêt de Bainem (Bainem Série Sud) durant le mois de mars, le sol est humide ce qui facilite les prélèvements. Ce site a été choisi dans le but d'évaluer les degrés d'érosion dans un site forestier non cultivé.

A travers notre étude, nous allons essayer de suivre le processus de l'érosion hydrique au niveau de ce site en utilisant une technique nucléaire Cs-137, et mettre en évidence la quantité de perte annuelle de sol en appliquant le modèle proportionnel.

La technique d'échantillonnage choisie est le transect (trajectoire), c'est un dispositif qui mettra en évidence la variation de la distribution du ^{137}Cs en fonction de la pente.

Le terrain étant légèrement pentu 8%, l'échantillonnage suit une ligne orientée dans le sens du gradient, la longueur de la ligne est de 120m ; Le profil de la figure 27 illustre l'aspect topographique du site d'échantillonnage.

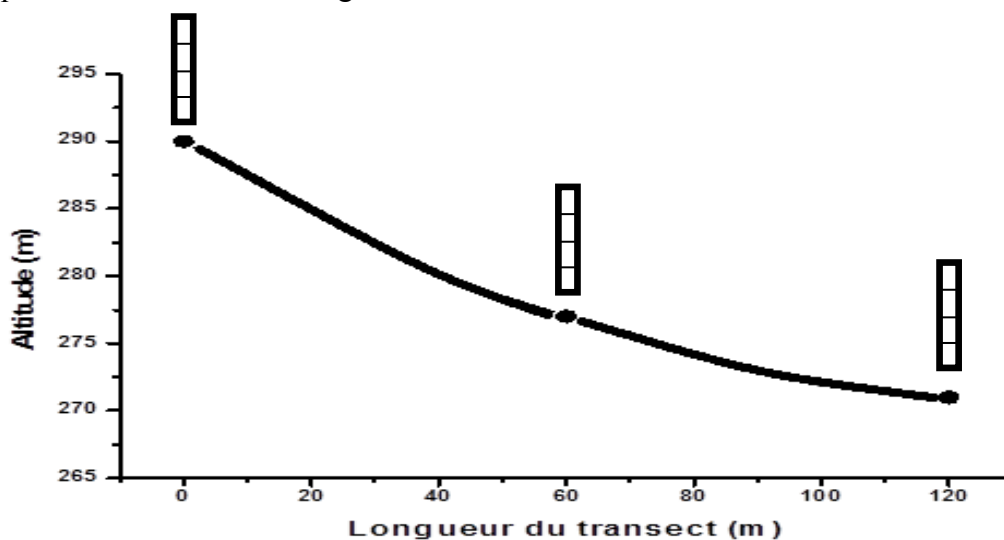


Figure 27 : Profil topographique

15 échantillons au total ont été prélevés : 3 carottes selon les profondeurs 0-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, et 3 échantillons prélevés à une profondeur moyenne de 10cm pour les mesures de la densité apparente.

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques des points de prélèvements.

Tableau 09: Caractéristiques des points de prélèvement.

Points de prélèvements	Distances partielles	Distances cumulées	Altitude	Latitudes	Longitudes	Type de sol
BSSTC1	0m	0m	290m	36°48'02.4''	002°58'14.2''	Siliceux
BSSTC2	60m	60m	277m	36°47'59.8''	0.02°58'13''	Siliceux
BSSTC3	60m	120m	271m	36°47'59.0''	0.02°58'11.8''	Siliceux

Après exécution du plan d'échantillonnage sur le terrain, les échantillons prélevés sont transportés sous conditions appropriées au laboratoire d'analyses du C.R.N.A.

IV-1-3) Mesure de la densité apparente :

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est, en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol. Elle permet, en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines, la cohésion des horizons et la réserve en eau du sol (**Yoro et al., 1990**).

- **Principe:**

C'est une méthode relativement rapide, qui est appliquée avec un minimum de matériel et quelques précautions ; elle permet d'obtenir des mesures précises de densité apparente.

Il s'agit de prélever un volume connu de sol non perturbé, afin d'en déterminer la densité apparente, ou certaines autres caractéristiques hydriques.

Appelée également la méthode au cylindre, elle a fait l'objet de la norme AFNOR NFX 31-501 (1992). L'objet est de déterminer le poids spécifique apparent (densité apparente) d'un volume de sol connu découpé in situ :

$$Da = \frac{P}{V_a}$$

Le prélèvement volumique (V_a) est effectué avec un cylindre tranchant et convenablement biseauté directement enfoncé dans le sol et dont les extrémités sont soigneusement arasées. L'échantillon est recueilli, séché et pesé (P) (**Pansu et al., 1998**).

Après séchage des échantillons, on a obtenu les masses suivantes :

Tableau 10: Mesure de la densité apparente.

Point	Masse (g)	Volume du cylindre (cm ³)	Densité apparente (g/cm ³)
BSSTC1	113,03	98,47	1,147
BSSTC2	141,21	98,47	1,434
BSSTC3	98,89	98,47	1,004

IV-1-4) Préparation des échantillons et conditionnements:

Comme ces échantillons sont destinés à l'analyse spectrométrique, une bonne préparation et conditionnement s'impose.

IV-1-4-a) Préparation des échantillons :

La préparation des échantillons passe par les étapes suivantes :

- Homogénéisation de chaque échantillon ;
- Pesage de l'échantillon avant séchage ;
- Séchage des échantillons à l'étuve à une température de 105° pendant 24 heures. L'intérêt d'une mesure spectrométrique d'un échantillon sec par rapport à un échantillon frais est lié à la facilité d'homogénéisation durant leurs préparations ;
- Broyage avec Mortier afin de détruire les agrégats ;
- Tamisage des échantillons avec un tamis de 2 mm de diamètre (la fraction grossière n'est pas porteuse de signal) ;
- Pesage de l'échantillon après séchage.

La figure 28 représente le matériel utilisé pour la préparation des échantillons.



Figure 28 : Matériels de préparation des échantillons (Khireche, 2015).

IV-1-4-b) Conditionnement des échantillons :

Après homogénéisation, chaque échantillon est conditionné dans des portes échantillons de type Marinelli comme le montre la figure 29.

Le Marinelli utilisé est un récipient de volume de 500 ml présentant une géométrie proche de 4π ce qui lui permet d'entourer le cristal du détecteur germanium, sur ce dernier, il sera positionné pour le comptage gamma durant 24 à 48 heures.



Figure 29 : Conditionnement des échantillons dans des portes échantillons de type Marinelli (Khireche, 2015).

IV-2) Analyse par spectrométrie gamma :

Les échantillons du sol sont mesurés à l'aide d'une chaîne de spectrométrie gamma composée d'un détecteur à semi-conducteur de type Ge(Hp) de haute résolution maintenu à la température de l'azote liquide.



Figure 30 : Spectrométrie gamma.

Les impulsions délivrées par le détecteur sont ajustées et amplifiées par un inspecteur de type DSA1000 (Desk Spectrometry Analysis) illustré dans la figure 18 (chapitre II). Les spectres sont visualisés sur l'écran d'un ordinateur, ensuite ils sont traités par le logiciel Génie-2000 qui nous donnera l'intensité de chaque raie gamma caractéristique.

Nous avons choisi un temps de mesure de 24 heures à 48 heures selon l'activité du ^{137}Cs dans l'échantillon, ceci permet une collection des radioéléments de faibles activités et avoir des bonnes statistiques de comptage.

IV-2-1) Analyse qualitative :

Avant de passer les échantillons de sols en mesure, la chaîne de spectrométrie est étalonnée en énergie et en efficacité.

IV-2-1-a) Étalonnage en Énergie :

L'étalonnage en énergie est réalisé avec un échantillon radioactif standard dont les énergies gammas émises sont connues et qui correspondent à l'énergie déposée dans le cristal.

Dans notre cas, nous avons utilisé une eau chargée en radionucléides « Spiked Water ». Cette eau est constituée d'Américium-242, Europium-152 et de Cobalt-60, elle est collectée par une chaîne de spectrométrie gamma, dans le but d'étalonner la chaîne de mesure en énergie. Il s'agit donc de tracer la droite qui définit l'énergie en fonction du numéro de canal en déterminant les coefficients a

et **b** de la droite d'étalonnage par la méthode du moindre carré à partir du spectre de la source radioactive (figure 31).

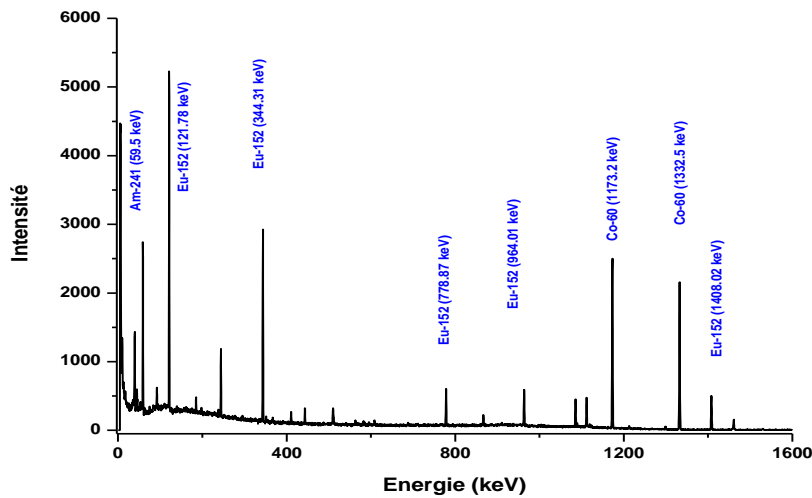


Figure 31: spectre de la source radioactive.

Les valeurs d'énergies et les numéros des canaux tirés à partir du logiciel Genie-2000 sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 11: Étalonnage en énergies de la chaîne de spectrométrie Gamma. (Sources radioactives Américium-242, Europium-152 et Cobalt-60).

Energies (keV)	Canal
59.45	161.32
121.78	329.29
244.82	661.03
344.43	929.86
778.8	2103.49
1112.04	3003.67
1408.02	3803.58
117.32	3169.91
1332.5	3599.41

La courbe d'étalonnage est représentée dans la figure suivante :

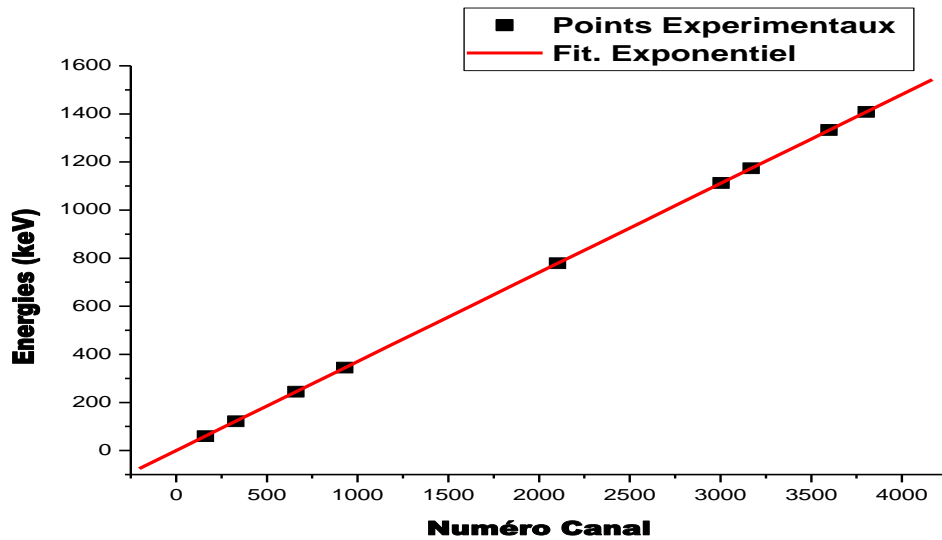


Figure 32 : Courbe d'étalonnage

$E = a Ch + b$, c'est la droite d'étalonnage, elle est obtenue en appliquant les méthodes des moindres carrés. Les valeurs des coefficients de la droite d'étalonnage sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Les coefficients énergétiques de la droite d'étalonnage.

$E = 0.3701 Chn - 0.00955$	
a (keV/canal)	b
0.3701	-0.0095

IV-2-1-b) Mesure de l'efficacité du détecteur :

L'efficacité du détecteur est définie par le rapport du nombre de photons détectés sur le nombre de photons émis par la source, selon l'expression suivante

$$\epsilon = \frac{I/t_c}{A * \gamma} \quad (05)$$

Où :

- ϵ : Efficacité du détecteur ;
- I : Intensité du pic photoélectrique ;
- A : Activité de la source à la date de mesure ;
- γ : Rapport d'embranchement ;
- t_c : Temps de comptage.

La mesure de l'efficacité du détecteur est effectuée à l'aide d'une source radioactive Américium-242, Europium-152 et Cobalt-60 d'une activité connue et d'une géométrie Marinelli. L'expression précédente de l'efficacité devient :

$$\varepsilon = \frac{I}{A_0 * e^{-\left(\frac{\ln 2}{t_{1/2}}\right) * t_d} * t_c * \gamma} \quad (06)$$

Où :

I_x : Intensité du pic photoélectrique,

A_0 : Activité initiale de la source donnée par le fabriquant,

$T_{1/2}$: Temps de demi-vie de la source d'Europium-152,

t_c : Temps de comptage,

γ : Facteur d'embranchement (probabilité d'émission gamma).

Les résultats de l'efficacité du détecteur Ge(HP) sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Valeurs de l'efficacité du détecteur.

Energies (keV)	Efficacité
121.78	0,0603± 0,00234
244.82	0,0468± 0,00190
344.43	0,0381± 0,00098
778.8	0,0197± 0,00081
1112.04	0,0162± 0,00061
1408.02	0,0123± 0,00070
117.32	0,0141± 0,00064
1332.5	0,0129± 0,00301

La courbe d'efficacité du détecteur est présentée dans la figure suivante :

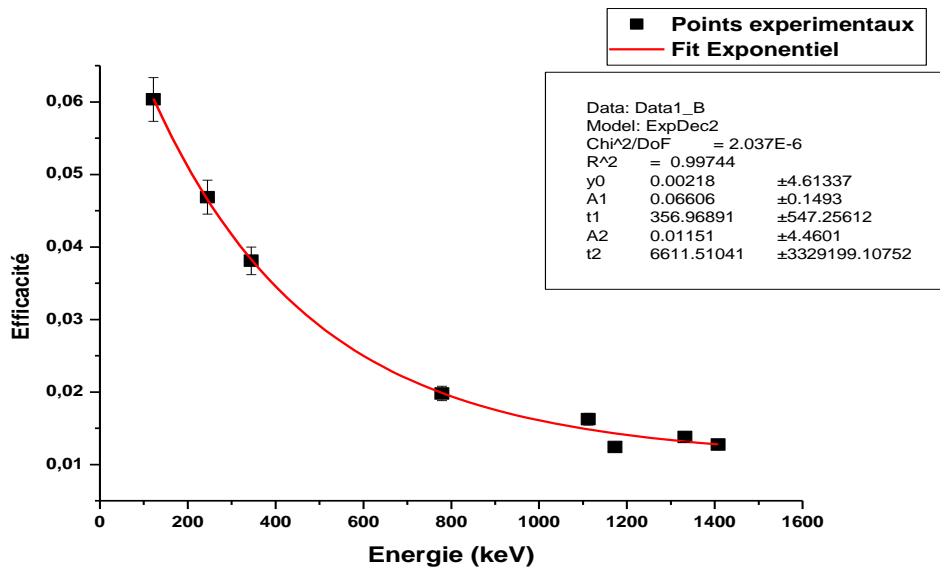


Figure 33: Courbe de l'efficacité du détecteur

Après avoir tracé la courbe expérimentale de l'efficacité du détecteur. Nous avons obtenu une droite exponentielle qui décroît en fonction de l'énergie.

La valeur de l'efficacité obtenue après l'interpolation des points expérimentaux pour la raie du ¹³⁷Cs est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 14: Valeur de l'efficacité pour la raie 661.6 keV du Cs-137.

Energies (keV)	Efficacité
661.6	0,0233±0.0012

IV-2-2) Analyse quantitative :

IV-2-2-a) Mesure de l'activité spécifique :

Après avoir mesuré l'efficacité du détecteur pour la raie 661,6 keV de la source du ¹³⁷Cs, nous avons effectué l'analyse quantitative des échantillons mesurés.

L'activité spécifique du ¹³⁷Cs est donnée par la relation suivante :

$$As = \frac{I}{\epsilon * \gamma * m * t_c} \quad (07)$$

Où :

A_s : Activité spécifique du césium-137 en (Bq/kg) ;

I : Intensité du pic photoélectrique en (Bq) ;

ε : Efficacité pour la raie 661.6 keV ;

γ : Rapport d'embranchement ou probabilité d'émission gamma ;

t_c : Temps de comptage en seconde ;

m : Masse de l'échantillon en (kg).

Les principales erreurs commises sur les activités spécifiques lors de l'analyse des échantillons de sols sont :

- ✓ L'erreur sur l'intensité (σ_I)
- ✓ L'erreur sur la masse de l'échantillon (σ_m)
- ✓ L'erreur sur l'efficacité (σ_ε)
- ✓ L'erreur sur le rapport d'embranchement (σ_γ).

Le calcul de l'erreur pour l'activité spécifique (σ_A) du ^{137}Cs se fait selon la formule suivante :

$$\sigma_A = A_s \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\gamma}{\gamma}\right)^2} \quad (08)$$

Le tableau 15 illustre les activités spécifiques du Cs-137 dans les différents échantillons du sol.

Tableau 15: Résultat de l'analyse des échantillons de sol, et de l'activité spécifique du Cs-137 (Bq/kg) en fonction de la profondeur.

Point	Profondeur (cm)	Intensité	Masse (kg)	Activité Spécifique (Bq/kg)
BSST Carotte 01	00 – 05	1,25E+04	0,521	28,46±3,06
	05 - 10	8,48E+03	0,612	32,36±3,50
	10 - 15	1,04E+04	0,971	20,75±2,23
	15 - 20	5,73E+03	0,950	9,04±0,97
BSST Carotte 02	00 – 05	4,86E+03	0,535	21,92±2,383
	05 - 10	1,03E+03	0,827	4,64±0,55
	10 - 15	1,07E+03	0,779	3,22±0,36
	15 – 20	3,89E+02	0,764	1,03±0,22
BSST Carotte 03	00 - 05	4,73E+03	0,589	18,56±2,01
	05 - 10	7,41E+03	0,613	28,80±3,11
	10 - 15	5,83E+03	0,624	9,20±0,99
	15 - 20	2,16E+03	0,599	4,47±0,50

Les valeurs des activités spécifiques du césium-137 présentées dans ce tableau montrent que la distribution du césium-137 varie d'un point à un autre en fonction de la profondeur. La valeur la plus élevée est 32,36 Bq/kg, enregistrée au niveau de la carotte numéro 01 à une profondeur de 10 cm ; tant dis que la plus faible valeur est 1.03 Bq/kg, enregistrée au niveau de la carotte numéro 02 à une profondeur de 20 cm.

IV-3) Application du modèle de conversion :

L'application du modèle proportionnel nécessite la transformation des activités spécifiques du Cs-137 exprimées en (Bq kg⁻¹) en activités surfacique exprimées en (Bq m⁻²) selon la relation suivante :

$$As (Bq \bar{m}^2) = \frac{m (Kg) * As (Bq/ Kg)}{S (m^2)} \quad (09)$$

As : Activité surfacique (Bq/m²) ;

m: Masse de l'échantillon (kg);

As: Activité spécifique du Cs (Bq/kg);

S : Surface du quadrant métallique (m²).

L'application du modèle de conversion a donné les resultats indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 16: les activités spécifiques en (Bq/m²).

Point	Profondeur (cm)	Activité Spécifique (Bq/m ²)
BSST Carotte 01	00 - 05	701,40±78,14
	05 - 10	952,87±106,47
	10 - 15	840,32±93,73
	15 - 20	321,52±35,97
BSST Carotte 02	00 - 05	556,36±62,52
	05 - 10	117,19±14,38
	10 - 15	85,20±10,02
	15 - 20	31,31±6,82
BSST Carotte 03	00 - 05	576,75±64,80
	05 - 10	977,54±109,25
	10 - 15	327,13±36,72
	15 - 20	165,09±19,24

V) Présentation des résultats et discussions:

Après les mesures spectrométriques des échantillons de sols, nous avons effectué une analyse qualitative et quantitative. Le traitement des spectres des échantillons de sols a été effectué à l'aide d'un logiciel développé et commercialisé par Canberra.

Dans le tableau suivant, nous récapitulons les principaux résultats d'analyses des activités spécifiques (Bq/kg) et surfaciques (Bq/m²) du Cs-137 au niveau du site de référence (BSSRC) et au niveau du site d'étude (BSST).

Tableau 17 : principaux résultats des activités spécifiques et surfaciques du Cs-137.

Point	Profondeur (cm)	Activité Spécifique (Bq/kg)	Activité surfacique (Bq/m ²)
BSST Carotte 01	00 – 05	28,46±3,06	701,40±78,14
	05 - 10	32,36±3,50	952,87±106,47
	10 - 15	20,75±2,23	840,32±93,73
	15 - 20	9,04±0,97	321,52±35,97
BSST Carotte 02	00 – 05	21,92±2,383	556,36±62,52
	05 - 10	4,64±0,55	117,19±14,38
	10 - 15	3,22±0,36	85,20±10,02
	15 – 20	1,03±0,22	31,31±6,82
BSST Carotte 03	00 - 05	18,56±2,01	576,75±64,80
	05 - 10	28,80±3,11	977,54±109,25
	10 - 15	9,20±0,99	327,13±36,72
	15 - 20	7,298±0,82	165,09±19,24
BSSR Carotte 01	00 - 05	28,24±3,04	645,28±71,95
	05 - 10	24,16±2,60	748,15±80,58
	10 - 15	12,36±1,33	442,81±47,76
	15 - 20	6,63±0,72	223,04±24,21

V-1) Détermination des activités du Cs-137 dans le sol :

Les figures ci-dessous illustrent les profils du Cs-137 dans les trois points du transect étudié et le site de référence.

V-1-1) Activité spécifique du ¹³⁷Cs au niveau du site de référence (BSSRC) :

Le tableau ci-dessus montre que les valeurs de l'activité du Cs-137 enregistrées varient de 28.24 Bq/kg en surface (645.28 Bq/m²) à 6.93 Bq/kg en profondeur (223.04 Bq/m²).

La représentation graphique de ces valeurs (figure 34) montre que l'activité spécifique du césium-137 présente une distribution sous forme exponentielle ; elle est maximale au niveau de la surface et décroît en fonction de la profondeur, ce sont les caractéristiques d'un site de référence.

Le site est localisé dans une partie de la forêt pratiquement plate, à une altitude proche du site d'étude, couverte par une strate arborée à pin d'Alep et par une couche de litière plus ou moins importante, ce qui permet la fixation du ^{137}Cs dans les premiers cm du sol, d'où sa forte concentration relative en surface (05 cm).

Les résultats obtenus dans le site d'étude peuvent donc être discutés par rapport au site de référence, en l'utilisant comme un site comparatif.

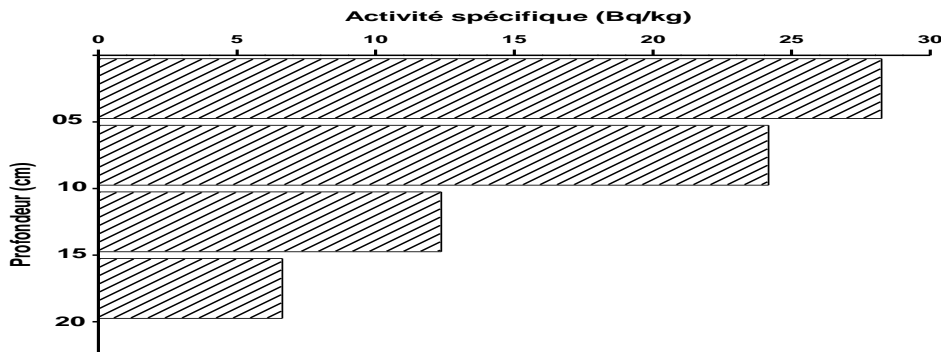


Figure 34: profil de l'activité du Cs-137 au niveau du site de référence

V-1-2) Activité spécifique du Cs-137 au niveau du site d'étude:

La zone d'étude est située à une altitude un peu plus basse du site de référence (290m), le terrain est pentu, à couverture végétale composée d'une strate arborée à Eucalyptus, une strate arbustive, et une couche de litière discontinue.

➤ **Distribution des activités du Cs-137 de la carotte 01 :**

D'après le tableau 17, on remarque que l'activité du Cs-137 au niveau de la carotte 01 est supérieure à celle du profil du site de référence, avec une valeur de 28.46 Bq/kg (701.40 Bq/m²) et 32.36 Bq/kg (952.87 Bq/m²) enregistrées respectivement à 05cm et à 10 cm de profondeur jusqu'à 9.04 Bq/kg (321.52 Bq/m²) à 20 cm de la surface.

La représentation graphique (figure 35) de ces valeurs au niveau des différentes profondeurs du profil montre que la distribution du Cs-137 est hétérogène.

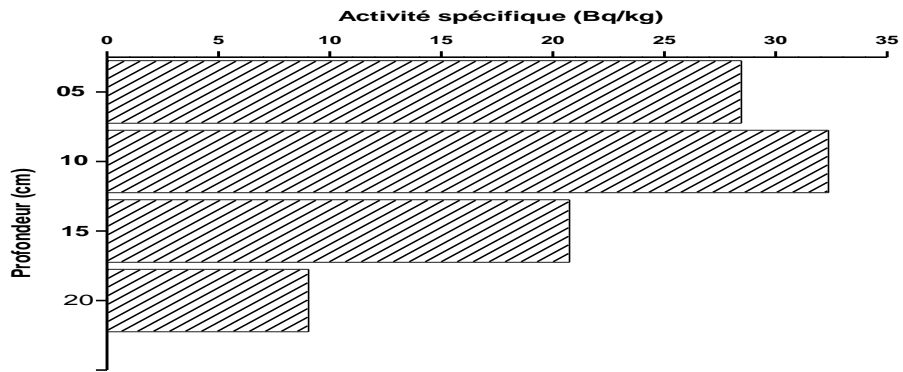


Figure 35 : profil de l'activité du Cs-137 au niveau de la carotte 01.

➤ **Distribution des activités du Cs-137 de la carotte 02 :**

Les valeurs mentionnées sur le tableau 17, montrent que l'activité spécifiques du césium-137 mesurées dans ce profil varient entre 21.92 Bq /kg (556.36 Bq/m²) au niveau de la surface et 1.03 Bq /kg (31.31 Bq/m²) en profondeur.

La représentation graphique des valeurs enregistrées aux niveaux des différentes profondeurs du profil (figure 36) montre que la distribution des activités du césium-137 ressemble à celles trouvées dans le profile du site de référence mais avec une légère diminution.

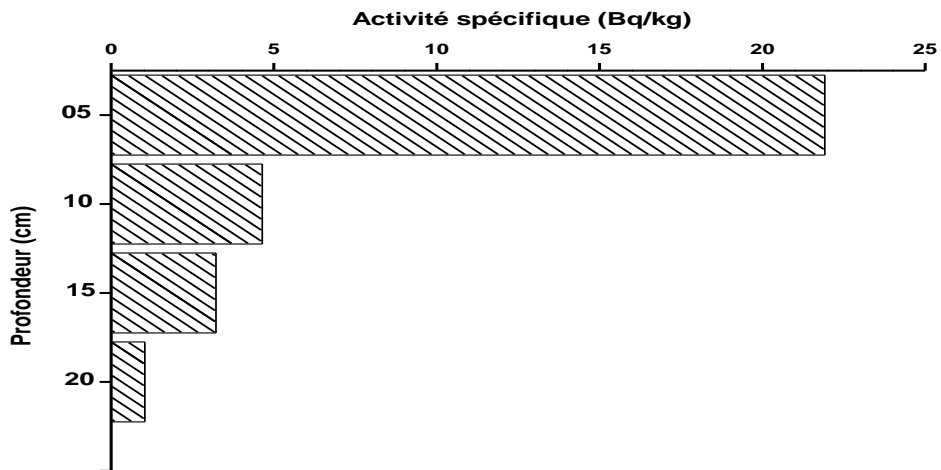


Figure 36 : profil de l'activité du Cs-137 au niveau de la carotte 02.

➤ **Distribution des activités du Cs-137 de la carotte 03 :**

Les valeurs des activités du césium-137 enregistrées au niveau de ce profile varient de 18.56 Bq/kg (576.75 Bq/m²) à 4.47 Bq/kg (165.09 Bq/m²). Ces valeurs sont inférieures aux valeurs du profile du site de référence.

La représentation graphique montre une distribution hétérogène du Cs-137 par rapport au profil du site de référence.

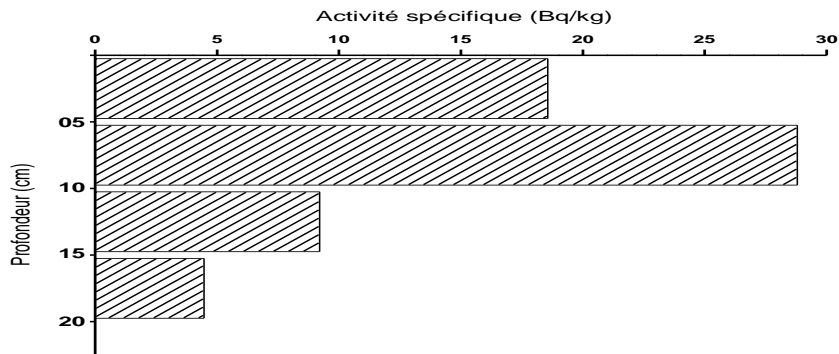


Figure 37 : profil de l'activité du Cs-137 au niveau de la carotte 03.

Le schéma de la figure 38, résume les profils de la distribution des activités spécifiques du Cs-137 dans les points de prélèvement.

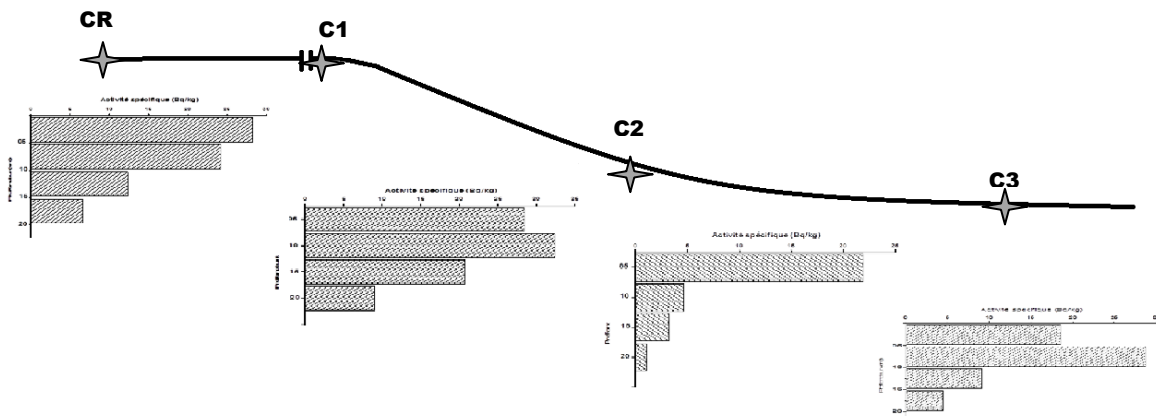


Figure 38 : distribution des activités spécifiques du Cs-137.

V-2) Estimation de la perte de sol :

Plusieurs modèles ont été proposés pour l'estimation de la perte de sol. Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à l'application du modèle proportionnel. C'est un modèle développé par l'Agence internationale de l'énergie atomique utilisé pour le calcul du taux de l'érosion hydrique,

il permet d'exprimer une relation entre la perte de sol et la quantité de césium-137 déplacée (Damnati et al., 2013).

En générale, l'application de ce modèle tient compte de l'effet sélectif des particules fines, puisque le césium-137 est plus adsorbé par ces dernières (Kessaissia, 2010).

La relation entre la perte annuelle moyenne de sol (t/ha/an) et l'activité surfacique (Bq/m²) du ¹³⁷Cs est donnée par l'expression suivante :

$$Y = \frac{10 B d X}{TP 100} \quad (10)$$

Y : perte annuelle moyenne de sol en (t ha⁻¹ an⁻¹) ;

B : densité apparente du sol (kg/m³) ;

d : la profondeur (m) ;

X: le pourcentage de réduction du Cs-137 par rapport à celui du site de reference.

X= (As_{ref} - As (Bq/m²) / As_{ref} * 100) ;

N : la période depuis l'initiation des accumulations (1963) ;

P : facteur de correction de la taille des particules.

Le tableau ci-dessous présente les résultats de la perte et gain de sol (t/ha/an) obtenus au niveau de chaque profil du transect étudié.

Tableau 18 : quantité de perte et gain de sol en t/ha/an mesuré par le modèle proportionnel.

Point	Perte ou gain moyenne annuelle de sol en (t ha ⁻¹ an ⁻¹)
BSSTC1	-4,05±0,25
BSSTC2	8.49±1.84
BSSTC3	0,05±0,33

Selon les résultats obtenus, les valeurs négatives indiquent une perte de sol, tant dis que les valeurs positives indiquent un dépôt de sol (Scoot van pelt et al., 2006).

Au niveau de la carotte 01, la valeur enregistrée est négative (-4.05 t/ha/an), cela traduit une perte de sol.

Le point de prélèvement de la carotte 01 est situé dans un endroit pentu, avec une couche de litière discontinue. Les pluies annuelles qui atteignent les 607 mm contribuent à l'apparition de marques de passage d'eau au niveau de la surface, ce qui est à l'origine du déplacement des particules du sol. Ce point peut être considéré comme une zone d'érosion.

La valeur mesurée au niveau de la carotte 02 est positive (8.49 t/ha/an), cela traduit un dépôt de sol.

Le point de prélèvement de la carotte 02 est caractérisé par une très faible pente, négligeable, le terrain présente une ablation permettant ainsi au sol entraîné par le ruissèlement de s'accumuler dans ce point, Ce qui confirme notre choix d'une zone d'accumulation.

La valeur déterminée au niveau de la carotte 03 est positive, et proche de zéro. Ce point a été échantillonné sur une zone plate, avec une couverture végétale moyennement dense. Il représente le dernier prélèvement de la ligne du transect, il s'agit d'une zone stable. Selon Sadiki et al. (2007), un site stable est un site qui présente une perte en sol proche de zéro.

V-3) Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus, montrent que l'activité du Cs-137 change d'un profil à un autre en fonction de la profondeur, comparativement au profil du point de référence ; cela montre que ce radio isotope se fixe fortement avec les particules du sol.

Au niveau du site d'étude, la couverture végétale est constituée en grande partie d'Eucalyptus, avec une couche de litière plus ou moins importante. Les plantations des Eucalyptus permettent de freiner et juguler la force des eaux de ruissellement. En effet, cette espèce est caractérisée par un feuillage persistant qui intercepte les gouttes des pluies, dissipant ainsi l'énergie cinétique, ce qui diminue l'effet "splash". L'Eucalyptus est dotée également d'un système racinaire qui s'adapte aux conditions extérieures, il comporte un pivot central profond et un réseau latéral dense s'étalant superficiellement ; l'arbre peut ainsi résister aux vents violents d'hiver en étant solidement ancré dans le sol, mais aussi collecter sur de grandes surfaces toutes les eaux de pluies.

Le système racinaire augmente la cohésion du sol, assurant ainsi un bon maintien de celui-ci et le protège contre l'effet de l'érosion hydrique, ce qui explique la faible valeur de la perte en sol enregistrée au niveau de la carotte 01.

La forêt constitue un moyen efficace de conservation du sol et de lutte contre l'érosion, surtout si elle est bien équilibrée du point de vue biologique et bien aménagée. La forêt de Bainem,

malgré les différentes perturbations qu'elle a subit (incendies, déboisement, défrichage...etc), son aménagement (installation de réseau de banquettes, de défense et de restauration des sols), ainsi que l'entretien des plantations, ont abouti à une bonne conservation du sol contre la dégradation sous l'effet de l'érosion hydrique et éolienne.

Le modèle proportionnel assure une relation linéaire entre la variation de l'activité spécifique du Cs-137 et le taux de perte de sol sous l'effet de l'érosion. L'application de ce modèle est simple, il pourra nous informer sur la perte de sol d'une manière directe ; néanmoins il présente certaines limites du fait qu'il ne prend pas en considération la dilution de la concentration du Cs-137 dans le sol et sa migration avec les particules du sol en profondeur, ce qui influe sur la quantité exacte de la perte de sol.

Conclusion Générale:

Notre travail avait comme objectif d'étudier et estimer l'érosion hydrique dans un site forestier de Bainem avec l'application du modèle proportionnel utilisé pour l'estimation de l'érosion des sols non cultivés, et pour l'évaluation de l'efficacité des pratiques de conservation des sols.

L'étude a débuté par un choix d'un site forestier au niveau de la forêt de Bainem. L'échantillonnage a été réalisé par la méthode du transect sur une parcelle expérimentale de 120 m de longueur et d'une pente moyenne de 8%. Cet échantillonnage permet l'étude de la distribution du Cs-137 le long du transect.

La parcelle choisie est caractérisée par 3 zones spécifiques :

- Zone d'érosion : sélectionnée au point de départ de la ligne du transect. Nous avons supposé qu'il s'agissait d'un point d'érosion, ce qui a été confirmé par les mesures expérimentales de la perte du sol par la méthode du FRN.
- Zone d'accumulation : située à 60 m du premier point. Nous l'avons choisi du fait qu'il constitue une zone d'ablation, cette dernière permet l'accumulation et le dépôt du sol sous l'action des eaux de pluie.
- Zone stable : c'est le dernier point de prélèvement au niveau du transect étudié. supposée comme une zone stable du fait que le terrain est plat, cette hypothèse est confirmée par les résultats spectrométriques déterminés.

La technique du FRN du Cs-137 offre la possibilité de donner des informations rapides et économique avec un seul échantillonnage, remplaçant et complétant dans certains cas de façon intéressante celles obtenues par des techniques conventionnelles, à savoir la technique des parcelles expérimentales de type Wischmeier qui est longue et coûteuse. L'étude de la redistribution du Cs-137 permet d'évaluer l'importance des mouvements de sol en cours depuis plus de 50 ans sous diverses conditions agro-climatiques.

L'application du modèle proportionnel, nous a permis de quantifier les zones d'érosions et d'accumulations vue la simplicité de son application. Il permet la détermination directe de la perte de sol avec un risque d'erreur acceptable. Ce modèle présente certaines limites comme toute méthode expérimentale qui peuvent être améliorées en appliquant d'autres modèles de quantification du sol.

Suite aux résultats encourageants obtenus, nous pouvons affirmer qu'au niveau de la forêt de Bainem la quantité de perte de sol est faible, ce qui prouve l'efficacité du plan d'aménagement à travers l'installation de réseaux de banquettes, de défense et de restauration du sol, les tranchés par

feu ainsi que la densité de la couverture végétale qui ont assuré un bon maintien de la structure du sol.

En perspective, il est souhaitable que notre travail soit poursuivi par d'autres travaux de recherches afin de compléter cette étude en utilisant d'autres radio traceurs pour l'évaluation de l'ampleur et de la dynamique de l'érosion à long et à court terme en appliquant respectivement les radioéléments ^{210}Pb et le ^7Be . Il sera intéressant aussi, d'utiliser d'autres modèles de quantification de l'érosion à savoir les modèles masse balance 01 et 02 qui permettent d'améliorer les résultats de la perte du sol obtenus dans ce travail par le modèle proportionnel en tenant compte de la dilution et la migration du Cs-137.

Durant ce stage, nous avons eu l'occasion de suivre un travail de recherche complet qui a débuté par le choix du site et stratégie d'échantillonnage jusqu'à l'obtention des résultats de la perte de sol dans un site non cultivé. Ces résultats sont supposés être les premiers obtenus à l'échelle nationale par la méthode du Cs-137.

Notons que, ce stage était primordial puisque les connaissances acquises tout au long du cursus universitaire sont complétées par un savoir faire dans lequel interviennent, la technologie, l'organisation, le milieu social, l'économie et la communication.

Ait Aider et Allileche. , 1993. Contribution à l'étude de la relation station-productivité subéricole du chêne liège (*Quercus suber*) dans le massif forestier de beni ghobri et de tamgout (Tizi ousou). Mémoire d'ingénieur en sciences agronomiques UMMTO.

Caillot A., 2002. La radioactivité au service de l'industrie. Edition tec et doc.

Aubert G. ; 1987. Tournée d'étude pédologique dans la région d'ouzera, bulletin réseau érosion 8.

Azbouche A., 2012. Cours CPEG : Principe de détection : Technique de mesure. DTN/CRNA.

Azbouche A., 2014. 8th African Conference on Research reactor utilization and Safety, Algiers 14-16 December 2014.

Azbouche A., Belgaid M., Mazrou H., 2015. Monte carlo calculations of the HPGe detector efficiency for radioactivity measurement of large volume environmental samples. *Journal of Environmental Radioactivity n° 146: 119-124.*

Belazreg S., 2006. Physique : cours, exercices, annales et QSM corrigés. 2^{ème} Edition. Ediscience.

Bernard C., Wicherek S., Laverdière M.R., 1995. Césium-137 et étude environnementales: exemple de l'érosion des sols. *Bulletin du Réseau Érosion n° 15: 424-432.*

Bernard C., Lionel M., Laverdière M.R., Wicherek S., 1998. Fertilité des sols et environnement: quelques outils, indicateurs et approches récentes : Césium-137 et érosion des sols. *Cahiers agricultures 7: 179-86.*

Blanc D., 1966. Les radioéléments : production, dosage, application. Edition Masson et Cie.

Blanc F., Ferraris G., Kappeler S., 2004-2005. Projet SIG environnement: Estimation du risque d'érosion hydrique. EPFL- SSIE.

Perraud B., 2009. Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. 2^{ème} édition. Edition de boeck.

- Bou Kheir R., Girard M-Cl., Khawlie M., Abadallah C., 2001.** Érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens: une revue bibliographique. *Étude et Gestion des sols*, vol 8: 231-245.
- Colle C., Adam C., Garnier-Laplace J., Roussel-Debet S., 2005.** Fiche radionucléide: Césium 137 et environnement. *Institut de Radioprotection et de sûreté nucléaire*.
- Damnati B., Ibrahimi S., Radakovitch O., 2013.** Utilisation du césium-137 pour l'estimation des taux d'érosion dans un bassin-versant du maroc. *Science et changements planétaires / Sécheresse* vol 15 n°2 avril-mai-juin.
- Duchaufaur Ph., 1997.** Abrégé de pédologie : sol, végétation, environnement. 5^{ème} édition. Edition masson.
- Duchaufaur Ph., 2001.** Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement. 6^{ème} Edition, Dunod.
- Emberger L., 1955.** Une classification biogéographique des climats. Recueil des travaux des labos de botanique, géologie et zoologie de la faculté des sciences de Montpellier fasc.7 :3-43.
- Escourrou G., 1978.** Climatologie pratique. Edition masson.
- Estienne P., Alain G., 1970.** Climatologie. Edition Armand colin.
- Greco J. ; 1966.** L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie.
- Hamadouche H., Lahlouh S.; 2004.** Contribution à l'étude de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique dans le haut SEBAOU (Bouzeguene et Ifigha).Approche Cartographique. Thèse d'ingénieur. Institut de biologie. Université UMMTO.
- INRF Unité d'Alger (Document interne), 2015.** Cadre physique et biotique de la forêt de Bainem.
- KESSAISSIA A., 2010.** Utilisation de quelques éléments radioactifs principalement le Cs-137 dans le suivi de la dégradation des sols. Mémoire Magister Université Aboubekr Belkaid Tlemcen.
- LE Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Draoussin J. ; 2002.** INRA : L'érosion hydrique des sols en France.
- Le petit G., Granier G., 2002.** Spectrométrie gamma appliquée aux échantillons de l'environnement. Edition TEC et DOC.

- Maalem Ms., 1998.** Rayonnements : exercices corrigés avec rappel de cours. Tome 1. 1ère Edition.
- Mabit L., Bernard C., Laverdière M.R., Wicherek S., 2008.** Cartographie des risques érosifs dans un bassin versant agricole du nord-est de la France. *Geoderma 145*: 245-251.
- Menager M., Garnier-Laplace J., Goyffon M., 2009.** Toxicologie nucléaire environnementale et humaine. Edition LAVOISIER.
- Montier C., Daroussin J., Dominique K., 1998.** Cartographie de l'aléa "Érosion des sols" en France. *Collection Étude et Travaux n° 18* : 1-61.
- Nicolas J., 1997.** Échantillonnage environnement. Edition Le Bedoc Editeur.
- Nahal I., 1975.** Principe de conservation du sol. Edition Masson.
- Pansu M., Gautheyron J., Loyer J-Y., 1998.** L'analyse du sol : échantillonnage, instrumentation et contrôle. Edition Masson.
- Poupon H., 1972.** description des appareils aérien et souterrain d'Eucalyptus introduit en Tunisie du nord. *OROSTOM, sér. Biol., n°17*: 47-59.
- Quézel P., Médail F., 2003.** Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Edition Lavoisier.
- Ramade F, 2009.** Élément d'écologie : Écologie fondamentale. 4 ème edition. Edition Dunod.
- Raoul calvet, 2003.** Le sol : propriétés et fonction : constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Tome 01. Edition France agricole.
- Riou G, 1990.** Eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux. Edition Masson.
- Robert M, 1996.** Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Edition Masson.
- Sadiki A., Fale A., Navas A., Bouhlassa S., 2007.** Assessing soil erosion and control factors by the radiometric technique in the boussouad catchment, eastern rif, Morocco. *Catene n° 71*: 13-20.
- Schlosser F, 2003.** Élément de mécanique des sols. Edition presse ponts et chaussées.
- Scoot Van Pelt R., Zobeck T.M., Ritchie J.C., Gill T.E., 2007.** Validation the use of Cs-137 measurements to estimate rates of soil redistribution by wind. *Catena n° 70*: 455-464.
- Termier H, Termier G, 1978.** Érosion et sédimentation. Edition Masson et Cie.
- Timhadjelt Y., Tafat H., Yantren D., 1992.** L'érosion en milieu cultivé: mesure

comparatives du ruissellement et des pertes en terre sur parcelles expérimentales à Médéa « compagnes agricoles 1990/1992 », mémoire d'ingénieur, faculté d'agronomie, UMMTO, Tizi ouzou.

Walto Ch., Remy J-C., Berthelin J., Mortel J-L., 2005. Sols et environnement. Edition Dunod.

Yoro G., Godo G., 1989-1990. Les méthodes de mesure de la densité apparente : Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné, *Cah. Orstom sér. Pédol*, vol. XXV, 4, 423-429.

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'étudier et estimer le processus de l'érosion hydrique dans un site forestier de Bainem à l'aide d'un radio traceur Cs-137, avec l'application du modèle proportionnel utilisé pour quantifier les pertes de sols en tonne/hectare/an dans les régions non cultivés, et aussi pour évaluer l'efficacité des pratiques de conservation des sols.

L'étude a été débutée par un choix d'un site forestier au niveau de la forêt de Bainem. L'échantillonnage a été réalisé par la méthode du transect sur une parcelle expérimentale de 120 m de longueur et d'une pente moyenne de 8%.

Les résultats obtenus au niveau du site d'étude indiquent que l'activité du Cs-137 change en fonction de la profondeur, ce qui montre que ce radio isotope se fixe fortement avec les particules du sol.

L'application du modèle proportionnel a montré que la quantité de perte en sol est faible, preuve que la forêt de Bainem, malgré les différents événements auxquels elle a assisté, elle a pu reconstituer son patrimoine forestier à travers les plans d'aménagements (installation de réseau de banquettes, de défense et de restauration des sols), ainsi que l'entretien des plantations, ce qui a abouti à une bonne conservation du sol contre la dégradation sous l'effet de l'érosion hydrique et éolienne.

Mots clés : sol, érosion, Cs-137, modèle proportionnel, forêt de Bainem.

Abstract:

The objective of this work is to study and estimate the process of erosion in a forest of Bainem using a radio tracer Cs-137, with the application of the proportional model used to quantify the losses of no cultivate soil at tonne/hectare/year, and also to evaluate efficacy of the practices of conservation of the soil.

The study was beginning with a choice of forestry site on the level from the forest of Bainem.

Sampling was carried out by the method of transect on a 120 m length experimental piece and an average slope of 08%.

The results obtained on the level of the site of study indicate that activity of Cs-137 changes according to the depth, which shows that this radio operator isotope is strongly fixed with the particles of the soil.

The application of the proportional model showed that the quantity of loss in ground is weak, proof that the forest of Bainem, in spite of the various events to which it assisted, it could reconstitute its forest inheritance through the plans of installations (installation of network of benches, defense and restoration of the soil), as well as the maintenance of the plantations, which led to a good conservation of the ground against degradation under the effect of hydrous and wind erosion.

Keys words: soil, erosion, Cs-137, proportional model, forest of Bainem.