

Research Article

EVALUATION OF THE FUNCTIONING OF THE URBAN AGRICULTURAL TERRACES SYSTEM THROUGH THE ISOTOPIC TRACERS OF CESIUM 137 AT THE LEVEL OF THE AL ARIN – GRAIGUER MEANDER: MIDDLE COURSE OF THE WADI ABHA (SOUTHWESTERN SAUDI ARABIA)

*Azaiez Naima

King Khalid University, Faculty of Human Sciences, Geography Department, Abha, Saudi Arabia.

Preparatory Institute for Literary Studies and Human Sciences of Tunis I (IPELSHT), Tunis city, Tunisia.

Research Laboratory: "Biogeography, Applied Climatology and Environmental Dynamics" (BICADE), Faculty of Arts and Humanities of Manouba, Tunisia.

Received 14th May 2021; Accepted 15th June 2021; Published online 15th July 2021

RESUME

Les terrasses agricoles dans la région d'Assir constituent un système d'exploitation agricole très répandu et un élément patrimonial clé de la région. Elles ont connu une profonde évolution paysagère, mais souvent produite en harmonie avec leur environnement et la préservation des bonnes pratiques paysannes. L'essor de ces banquettes, qui remonte à plusieurs siècles, indique un savoir-faire ancestral et une bonne compréhension du bilan sédimentaire entre les différents niveaux des banquettes sculptées en cascade de part et d'autre des lits des cours d'eau à écoulement intermittent. Ces pratiques agricoles sont perpétuées jusqu'à nos jours de génération en génération et sont transmises de père en fils dans le cadre d'une agriculture vivrière de subsistance. C'est de cette manière que la productivité a été maintenue et même améliorée en qualité et en quantité. Toutefois, il faut signaler que les avantages et la stabilité l'emportent sur les risques de dégradation de terres dans les vallées aménagées, mais on ne sait pas à quelle mesure. En revanche, toutes les recherches récentes insistent sur le fait de la dégradation de plus en plus prégnante, notamment des terres arables sur les versants d'Assir comme étant un phénomène généralisé qui a accompagné les changements socioéconomiques et la détérioration des conditions édaphique et climatique à l'échelle régionale. Pour démontrer l'efficacité des banquettes agricoles en termes d'engraisement du sol ou de sa dégradation sur des versants très pentus, on a choisi d'appliquer une démarche basée sur le suivi de marqueurs isotopiques du Césium 137 capables de donner un complément essentiel d'information sur le mode de déplacement de sédiments et le rythme d'acheminement des particules du sol le long du transect situé à l'intérieur du méandre convexe de la berge nord de l'oued Abha. La zone d'étude se situe entre El Arine et Graiguer, juste avant 100 m de sa confluence avec l'affluent de l'oued Jouhane venant du quartier El Mensek. L'inventaire des radionucléides de Césium 137, qui n'est pas considéré comme exhaustif, a montré une activité qui varie entre 3826 bq/m² et 239 bq/m². Il convient toutefois de mentionner la grande disparité de l'activité du Césium 137 même à une échelle très restreinte de quelques dizaines de mètres (123 m du long sur 64 m de large pour l'ensemble des cinq terrasses). Ce constat révèle une dynamique hydro-sédimentaire très remarquable, mais qui semble être influencée par certains processus internes qui caractérisent le mode de fonctionnement du système des terrasses agricoles plus que les conditions climatiques, surtout les quantités pluviométriques et la déflation éolienne.

MOTS CLES: Accumulation, Terrasses agricoles urbaines, Cours moyen de l'oued Abha, dégradation, méandre Al Arin–Graiguer, traceurs isotopiques du Césium 137.

INTRODUCTION

Généralement les cultures exigeantes de l'eau et d'éléments nutritifs sont toujours pratiquées dans les terrasses inférieures ou médianes, constamment submergées par les eaux des crues et renouvelées en sédiments fins remaniés le long des versants et les cheneaux des cours d'eau. Les particules fines sont généralement piégées contre les ados des cordons en pierres sèches, les murettes en courbe soutenant les terrasses cultivées et aussi contre les corridors de végétation (Hamza, 1988 ; Nasri, 1995 ; Nasri, 2002; Sean Bennett, et Andrew Simon, 2004 ; Park, 2009). Tandis que les cultures moins exigeantes en eau et en sels minéraux sont toujours gardées pour les hautes terrasses situées sur les hauts versants où les pentes sont considérablement plus fortes. La résistance de cet agrosystème en plein milieu urbain, prouve que cette technique des terrasses agricoles s'adapte avec les données morphostructurales, climatiques et hydrologiques de la région. Ce fait confirme que le développement urbain et les changements socioéconomiques qu'a connu la région au cours des dernières années ne sont pas

tenus à l'encontre des lois de l'environnement, notamment que la société paysanne au passé, a bien su exploiter l'hydrosystème de l'oued Abha. Les apports en eau et en éléments fins ont fait de ces terrasses un espace vital pour les paysans. Malgré la longue période d'exploitation et de mise en valeur, qui remonte à des siècles, le sol n'a pas perdu sa valeur à cause de son affaiblissement et de son exténuation. Ce fait prouve que ses éléments sont auto-renouvelés, parce que l'équilibre entre les agents de la morphogénèse à la surface et les processus de la pédogenèse dans l'horizon d'altération n'a pas été rompu (Tricart, 1971). C'est-à-dire la rétention de l'eau dans les parcelles sur une longue période a permis de déclencher les processus de météorisation et d'approfondir le front d'altération de la roche mère granitique qui date du Précambrien. Cette recherche a double objectif, d'abord l'estimation de l'impact de l'agrosystème des terrasses agricoles sur les spécificités physiques du sol, notamment sa texture et son épaisseur. Ensuite, l'estimation du bilan sédimentaire le long de la berge d'un méandre convexe de l'oued Abha, dont l'objectif est de mettre en lumière les différents processus hydro-sédimentaires qui pourraient se produire entre les hautes et les basses terrasses agricoles (Fig. 1). Bien que situés sur un terrain très favorable à l'érosion hydrique, essentiellement lors des pluies torrentielles, les sols lourds qui surmontent les terrasses inférieures ont une épaisseur notable, alors que ceux situés sur la haute berge sont légèrement appauvris, parfois à pas très accélérés (Azaiez, 2016 ; Azaiez et al, 2020 et 2021). Ce fait est causé par la déprise rurale, la crise climatique et la diminution de l'apport terrigène en

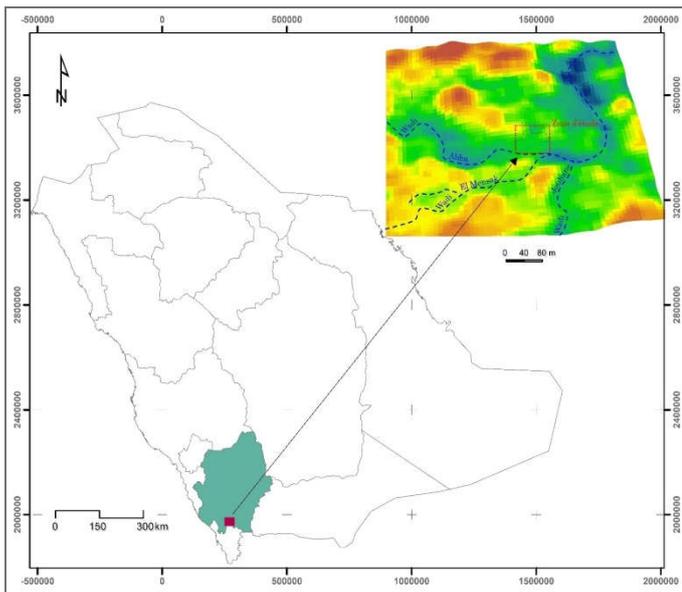
*Corresponding Author: Azaiez Naima,

King Khalid University, Faculty of Human Sciences, Geography Department, Abha, Saudi Arabia,

Preparatory Institute for Literary Studies and Human Sciences of Tunis I (IPELSHT), Tunis city, Tunisia.

sédiment et en matière organique suite de l'extension accrue de tissu résidentiel et la multiplication des aménagements de l'infrastructure urbaine qui ont largement modifié le système de drainage. C'est un fait prouvé par la dégradation et la mort de genévrier oxycède suite de la détérioration des conditions édaphiques sur les versants les plus haut d'Assir (El Atta et Aref, 2010 ; Azaiez et al, 2020 ; Azaiez, 2021). A travers l'exemple de la section du cours moyen de l'oued Abha située entre les deux quartiers Al Arin et Graiguer, on cherche à comprendre le fonctionnement du paysage agraire en relation avec les interactions entre le sol l'agrosystème des terrasses et l'hydrosystème de l'oued Abha (Fig 1).

Figure 1 - Carte de localisation des terrasses agricoles du méandre Al Arin–Graiguer : Cours moyen de l'oued Abha (région d'Assir)



Contrairement à la démarche traditionnelle de son utilisation, le traceur isotopique du Césium 137 est appliqué dans cette recherche, pas seulement pour quantifier les sédiments déposés ou érodés depuis plus de quatre décennies à partir des retombées datant du début des années 1960 et les retombées de Tchernobyl en 1986, mais aussi pour comprendre les processus qui entrent en jeu dans la dynamique des versants (McHenry, 1985 ; Ritchie et al., 1990 et 1993 ; Wicherek et al., 1993 ; Mabit et al., 1999, Zapata, 2002 ; Faleh 2010, Al Katmour, 2004 ; Ben Mansour et al, 2006 ; Ali, Mutlaq and Abdullah, 2015 ; Azaiez, 2016 ; Azaiez, 2020). Une question se pose, néanmoins, sur le délitement et l'effritement de certains cordons en pierres sèches et des murettes qui protègent les terrasses agricoles, s'ils sont considérés comme des signes de dégradation ou d'engraissement et d'évolution du sol. Il ne s'agit pas ici de trancher entre les deux hypothèses, dans la mesure où les deux sont possibles et probables. Il est certain que les deux hypothèses ne sont pas parfaitement compatibles, mais l'effritement de quelques cordons en pierres sèches est un indicateur parmi d'autres sur l'emprise de l'érosion hydrique notamment lors de la concentration des eaux pluviales derrière les murettes. Comme il peut être aussi un signe de témoignage positif sur une pédogenèse amorcée et sur l'épaississement du sol suite de la décantation des éléments fins du sol, qui à long terme débordent en causant l'effritement des murettes (Aubert, 1986 ; Hamza, 1988 et al., Roose, 2004 Al Karkouri et al., 2002 ; Azaiez, 2016 ; Azaiez, 2020). L'explication de ce fait nécessite d'abord de commencer au point de départ de la mise en place de ces cordons en pierres sèches pour comprendre si ces cordons sont mis en place directement sur les affleurements de roches granitiques dans le passé lointain ou non. Aussi les fortes infiltrations qui

attaquent le matériel meuble issu des roches granitiques transformées sous l'effet de la météorisation peut être considéré l'une des principales causes de la dynamique érosive. Ce fait donne l'occasion au ravinement pour se manifester et en faire des versants dénudés le siège des mouvements de masse. Il est nécessaire de comprendre l'enchaînement des différents processus et leur rythme qui restent toutefois marqués par des discontinuités dans le temps et dans l'espace. Raison de plus, le calcul du bilan sédimentaire, bien que possible, se heurte à des difficultés, surtout que les éléments arrachés aux versants n'arrivent pas à l'issue du bassin versant avec le même rythme. De ce fait, il y a une grande possibilité que la banquette agricole inférieure puisse abriter des sédiments provenant des endroits plus variés et des versants plus loin, notamment des sommets qui enregistrent des quantités pluviométriques très élevées et capables de conditionner un ruissellement fort et par conséquent une forte activité du Césium 137 (exemple les versants Sud et Sud-Est de la montagne de Souda 3015 m). Concernant l'apport latéral dans la zone d'étude sur la haute terrasse, il est presque nul pendant ces dernières années à cause de l'étalement de tissu urbain, l'infrastructure et les aménagements urbains qui ont entravé le déplacement des particules du sol pour alimenter la terrasse en apport sédimentaire. C'est-à-dire le sol de la haute terrasse se renouvelle actuellement lentement à travers la combinaison et l'interaction entre les processus de la météorisation et les pratiques agricoles. Ainsi, cette situation suppose que les quantités entrantes de Césium 137 sont équivalentes aux quantités de départ des années 1960 jusqu'à l'année 2019 si la terrasse a connu une stabilité durant cette période, parce que les particules du Césium 137 ne se dégradent qu'à travers l'érosion mécanique. A cela s'ajoute les apports des gouttes des pluies qui s'abattent sur les parcelles. Aussi les éléments du sol tranchés et enlevés de la berge par l'écoulement ou bien la formation des petites banquettes d'accumulation tout près de chenal de cours d'eau ne sont pas accordées à la haute terrasse. Ainsi, un suivi sera nécessaire pour distinguer entre la mobilité longitudinale et la mobilité latérale des sédiments. Certains processus se contrecarrent entre eux, comme la prolifération de ruissellement diffus superficiel ne permet pas le déclenchement des mouvements de masse et vice versa (Tricart, 1971). Aussi les infiltrations rapides peuvent stimuler des mouvements de masse en profondeur sans formation de ruissellement à la surface (Tricart, 1971). En effet, la mise en œuvre des banquettes et des cordons en pierres sèches pourra conduire très facilement à des fortes infiltrations des eaux retenues contre les ados, ce qui explique la migration verticale du Césium 137 vers les horizons les plus profonds du sol après une période de stagnation. Lorsque l'écoulement dans le chenal est très important, l'érosion concentrée et l'incision linéaire vont prendre l'élan par rapport à l'érosion diffuse, surtout sur la rive concave. Dans ces conditions, l'intervention humaine doit être focalisée sur la correction de lit et la mise en œuvre des petits hydrauliques sur les impluviums et dans les secteurs de rupture de pente, surtout dans la partie amont du bassin versant de l'oued Abha. Si au contraire l'apport en sédiment est en grande partie latéral, cela veut dire qu'il faut apporter des corrections sur les berges des cours d'eau à travers la fixation biologique et l'entretien des terrasses agricoles et des cordons en pierres sèches qui ont montré des résultats satisfaisants et prometteurs depuis des siècles. La détermination des caractéristiques physico-chimiques des sols et des formations superficielles et l'élaboration d'une carte détaillée de la dynamique actuelle aideront à déterminer l'état de ces terrasses agricoles si elles sont dans une nouvelle phase de dégradation ou non. Il paraît pertinent de savoir si les terrasses agricoles ont été mises en place suite d'une nécessité prédictive ou productive ou les deux à la fois ? Cela veut dire que les ancêtres ont compris d'une manière précoce qu'il faut sortir du cadre très « étroit du terme sol » (Tricart, 1971) pour aller plus loin jusqu'aux déclenchement des mécanismes et des processus mécaniques,

chimiques et biologiques responsables de la formation du sol. Toutefois, il ne faut pas négliger l'effet du vent, parce que les particules fines d'argiles et le limon de débordement qui adsorbent les particules du Césium 137 déposées par les gouttes de pluies deviennent suffisamment légères et facilement remaniables par le vent pendant la période sèche avec tout ce qu'il contient de Césium 137. Si l'écoulement et le ruissellement diffus déplacent les particules du sol toujours dans le sens de la pente du haut en bas, au contraire le vent a la possibilité d'arracher, de transporter et de déposer ces éléments fins dans le sens inverse de la pente à partir des basses terrasses vers les hautes terrasses sous forme de placage éolien. On parle aussi de la brise de la montagne et brise de la vallée comme étant une dynamique pouvant provoquer une déflation éolienne et une mobilisation de sédiments dans des directions différentes. Ainsi, la haute terrasse agricole peut s'enrichir occasionnellement en Césium 137 sous l'effet du vent. De ce fait, il faut prendre en considération ces apports supplémentaires récents qui se concentrent essentiellement dans l'épiderme superficielle du sol. On estime que le vent semble avoir un effet très secondaire parce que les sols situés de part et d'autre du chenal de l'oued Abha retiennent davantage l'humidité sur une longue période de l'année même si le vent souffle fréquemment, parce que l'humectation du sol renforce davantage la cohésion entre ses éléments, ce qui laisse penser que le vent a un effet très négligeable comparé au potentiel enrichissant en Césium 137 produit par les précipitations (McHenry et al, 1985 ; Ritchie et al, 1990 et 1993 ; Wicherek et al, 1993 ; Mabit et al, 1999, Porto et al, 2003 ; Al Katmour, 2004 ; Faleh 2010 ; Ben Mansour et al, 2000 et al., 2012 ; Azaiez, 2016 ; Azaiez, 2021). On veut comprendre la logique paysanne de l'édification des terrasses agricoles pour savoir si elles ont été mises en œuvre pour répondre à des préoccupations de lutte antiérosive ancienne et pour enrayer toute concentration des eaux de ruissellement ou bien pour répondre à des préoccupations d'amélioration de la production (Aubert, 1986 ; Al Karkouri, Wafteh et al., Aderghal, 2002, Azaiez 2016, 2020 et al., 2021). Est-ce que ces terrasses peuvent faire face à tout type des formes érosives et des dynamiques des versants (glissement, ravinement et écoulement hypodermique, ruissellement diffus) ?

Il faut prendre en considération les types des sols qui surmontent l'ancien socle et des sols dérivés des roches granitiques qui sont particulièrement sensibles à l'érosion hydrique. Ce fait est prouvé par le départ sélectif des radionucléides du Césium 137 adsorbés par la fraction argilo-limoneuse du sol. Au niveau de la méandre El Arine El Graiguer où les sols sont formés sur un socle cristallin à prédominance de granites alcalines qui donnent des sols légers et profonds sur les deux hautes terrasses et des sols lourds dans les autres terrasses en bas parce que les processus de la météorisation chimique et biologique sont plus actifs grâce à l'humidité retenue dans l'horizon d'altération. Les sols à texture fine ont une bonne aptitude à retenir l'eau grâce à la faible porosité interstitielle qui réduit les pertes en eau à travers l'évaporation, surtout en présence d'un couvert végétal naturel et aussi à travers l'infiltration.

METHODOLOGIE, OUTILS ET APPLICATION

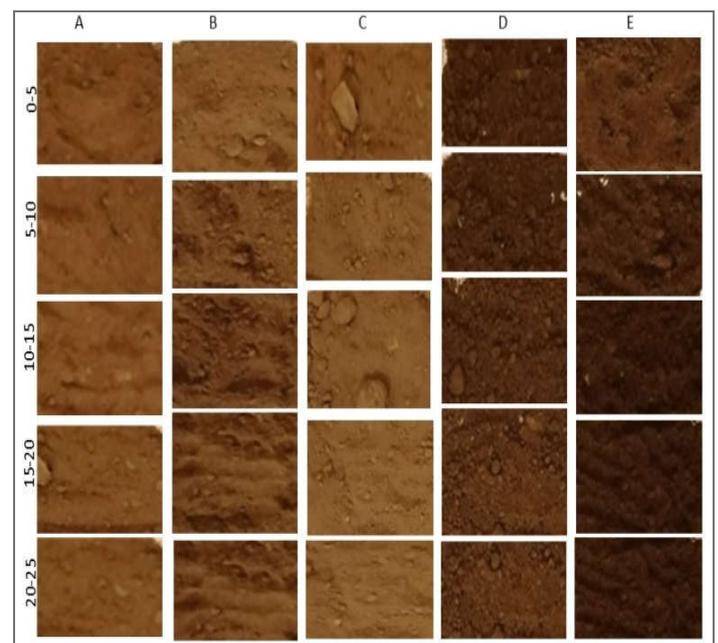
Le Césium 137, comme traceur radioactif pertinent, pourra être utilisé à des échelles variables et à des fins diverses autres que de la quantification des pertes en terre et la prévision des ressources en sol à long terme depuis le début des années 1960. Les travaux réalisés dans des petites parcelles à l'échelle mondiale ont montré des résultats beaucoup meilleurs que les résultats obtenus des études effectuées à des échelles plus larges (continentale, régionale et à l'échelle des bassins versants) (Bernard et al, 1992 et al., 1998 ; Mabit et al, 1998 ; Zhang, 1999 ; Zapata, 2002 ; Felah, 2010 ; Zhang 2015 et Azaiez, 2016). Cela ne veut cependant pas dire de rompre

complètement avec les études générales de synthèse. Ces dernières, sont toutefois nécessaires pour orienter les chercheurs et pour faire des comparaisons. Elles permettent aux chercheurs d'évaluer la représentativité des résultats, d'orienter l'échantillonnage, de choisir les sites prioritaires et de fixer des objectifs dans les prochains projets de recherche. Les études générales rendent plus faciles les comparaisons entre les différents systèmes morphogéniques, des pratiques agricoles et des divers facteurs et des processus qui entrent en jeu dans la mobilité des sédiments et le façonnement du paysage géomorphologique.

ECHANTILLONNAGE PAR TRANSECT

Six échantillons ont été prélevés, dont cinq d'entre eux sont prélevés dans des terrasses agricoles étagées (Fig. 2). Un sixième échantillon a été prélevé dans un site stable distant de 300 m de la zone d'étude et qui était à l'abri de toute intervention humaine durant plus de trois décennies successives selon le témoignage des habitants proximaux de la zone d'étude. Aujourd'hui, ce site stable de référence ne montre aucun signe d'anthropisation. L'échantillonnage a été effectué à l'aide d'un tube de PVC de 6 cm de diamètre sur une profondeur de 25 cm seulement vu que les sols sont peu poreux et l'apport pluviométrique annuel est faible. De ce fait, le Césium 137 est identifié dans les 25 premiers cm seulement de la couche du sol. Les quantités prélevées ont été largement suffisantes pour les analyses isotopique et granulométrique. Cette dernière qui a fourni d'autres éléments de réponse concernant le suivi et l'explication de la migration verticale et latérale des isotopes du Césium 137. C'est la texture et la structure du sol qui semblent être à l'origine de la dynamique érosive. Il s'est avéré que la manifestation érosive, exercée à partir des hautes terrasses vers les basses terrasses, est accompagnée d'un changement radical dans la texture et la couleur du sol (fig. 2). On passe des sols légèrement sableux en haut à des sols lourds à texture plus fine à la base. (fig. 2)

Figure 2 - Les aspects granulométriques des différents échantillons du sol de prélevés dans les cinq terrasses agricoles sur la berge nord de l'oued Abha entre El Arine et El Graiguer (Source : Azaiez Naima, 2019)



DESCRIPTION DE SITE ET DES CONDITIONS DE PRELEVEMENT DANS LE MEANDRE AL ARIN - GRAIGUER :

Le site de prélèvement concerne la zone de méandre convexe entre Al Arin et Graiguer de l'oued Abha. Il s'agit d'une berge sculptée en 5 terrasses agricoles séparées par des cordons en pierres sèches et par endroit, les murettes sont maintenues et renforcées par un corridor végétal. Plus à l'aval, un corridor végétal principal de 16 à 25 mètres de large sépare la terrasse inférieure du talweg. Cette végétation ripicole, peut jouer un rôle important dans le fonctionnement hydrologique et le bilan morpho-sédimentaire dans cette section de cours d'eau (Fig. 3). Le prélèvement des échantillons est effectué au printemps de l'année 2019, où les terrasses sont en majorité cultivées, sauf les deux terrasses intermédiaires 2 et 4 qui sont en jachère pendant cette période de l'année. Sur une profondeur de 25 cm, cinq carottes ont été minutieusement prélevées en vue d'une analyse isotopique détaillée du Césium 137 au moyen d'une analyse séquentielle à pas de 5 cm. Après leur préparation physique, les échantillons sont sélectionnés, préparés et soumis à un examen par spectrométrie gamma au sein de laboratoire de radiochronologie C.E.N. (Centre d'Etudes Nordiques), conformément au protocole officiel approuvé par la communauté scientifique.

Figure 3 - Extension des cinq terrasses agricoles et des corridors végétaux sur la berge nord de l'oued Abha entre El Arine et El Graiguer (Source : Image Google Earth Pro, 2020)



A une profondeur entre 24 et 26 cm, la moyenne de la radioactivité du Césium 137 est maintenue à un niveau très bas ou non détectable. En effet, la technique radiométrique du Césium 137 peut donner des éléments de réponse supplémentaires sur l'effet combiné de la végétation ripicole d'une part et le mode de fonctionnement des terrasses agricoles et des cordons en pierres sèches d'autre part. C'est à travers le suivi de l'acheminement et de piégeage des particules du sol, que cette recherche sera développée sur la base

d'un argumentaire proprement expérimental faisant intervenir l'inventaire concernant l'activité du traceur isotopique du Césium 137 sur une courte distance et dans des conditions morphoclimatiques homogènes (photo 1).

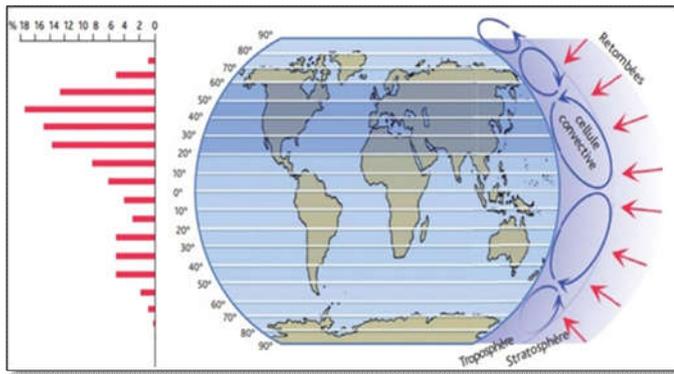
Confirmé par des études géomorphologiques postérieures (Tricart, 1971 ; Sean et al, 2004 ; Wicherek et al, 1993), les géomorphologues insistent sur le fait que la majorité des processus érosifs reliés à l'action de l'eau se développent surtout dans la section de lit moyen et de moins aux moins dans la section de lit mineur. C'est grâce au bon fonctionnement de la bande active du corridor végétal près du chenal, que l'amortissement du courant de l'eau était possible. Par conséquent, une rétention optimale de la matière organique dissoute et en suspension véhiculée par les eaux des crues (Tricart, 1971 ; Sean et al, 2004).

Photo 1 – Position de la terrasse agricole inférieure lors d'une crue ordinaire de l'oued Abha dans la section Al Arine - Graiguer



En effet, l'échantillonnage exhaustif à l'échelle de la parcelle apporte des précisions supplémentaires sur l'activités rémanente du Césium 137 mesurée dans les différents échantillons du sol prélevés vers la deuxième moitié de l'année 2019. Il faut admettre dès le début que les retombées radioactives du Césium 137 ne changent pas beaucoup à l'échelle de quelques dizaines de mètres dans la mesure où les quantités pluviométriques sont les mêmes dans les cinq parcelles. Il y a une relation de proportionnalité directe entre les fortes activités de Césium 137 et les moyennes pluviométriques les plus fortes (McHenry, 1985 ; Ritchie et al, 1990 et 1993 ; Wicherek et al, 1993 ; Mabit et al, 1999, Zapata, 2002 ; Faleh 2010, Al Katmour, 2004 et Ben Mansour et al, 2012, Azaiez, 2016 et Azaiez, 2020). En général, le Césium 137 se fixe dans le sol, le plus souvent, par voie humide via les précipitations, quant à sa fixation par voie sèche, elle demeure faible et rare sauf dans les secteurs situés dans le rayon de quelques kilomètres des réacteurs nucléaires, qui ne sont pas également répartis entre les deux hémisphères et entre les continents (Sylvie Roussel-Debet, Fiches IRSN, 2006 et 2008). Sachant que 55 % des retombées se concentrent au nord de la 30^{ème} latitude nord et 75 % pour tout l'hémisphère nord. Ainsi, la zone intertropicale, à laquelle appartient l'hydrosystème de l'oued Abha, se trouve un peu en dehors du rayon d'influence de nuage radioactif provenant des grands réacteurs mondiaux (Sylvie Roussel-Debet, Fiches IRSN, 2006 et 2008) (Fig. 4).

Figure 4 - Répartition mondiale des retombées radioactives en fonction de la latitude (Source : Sylvie Roussel-Debet, 2006, Les essais atmosphériques d'armes nucléaires : une pollution radioactive à l'échelle planétaire, Fiches information, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN))



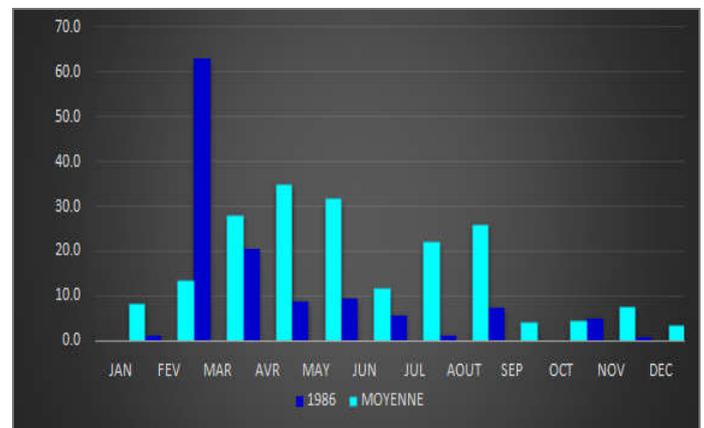
En plus, la circulation générale des vents dominants a poussé une bonne partie de ces particules vers l'est et d'autres éléments seront perdus dans la stratosphère, sachant que leur retour par gravité à la surface de la terre est un peu difficile puisqu'ils sont très vite entraînés par les cellules convectives de la circulation générale (Sylvie Roussel-Debet, Fiches IRSN, 2006 et 2008). La part du dépôt humide du Césium 137 dans le monde entier dépasse largement la part du dépôt sec, parce que les isotopes du Césium 137 se fixent dans le sol à travers les gouttes de pluies qui s'abattent sur le sol. (Champion, Renaud, et Metivier, 2006 ; Felah, 2006 et al., Azaiez, 2016 et al., 2020). Ils sont rapidement adsorbés par la fraction argileuse et ne se détachent pas facilement qu'à l'occasion d'une éventuelle érosion mécanique (Wicherek et al, 1993 Zapata, 2002 ; Felah, 2010 ; Azaiez, 2016 et 2020). Dans le cas de l'hydrosystème du cours moyen de l'oued Abha, le dépôt du Césium 137 est probablement fixé par voie humide plus que par voie sèche compte tenu des situations atmosphériques, la position de la zone d'étude par rapport aux réactifs nucléaires et le trajet de passage du nuage radioactif. D'une part, le dépôt sec demande des situations atmosphériques plus calmes sans turbulence pour que les particules puissent descendre par gravité. (Sylvie Roussel-Debet, Fiches IRSN, 2006 et 2008). D'autre part, il faut que le site soit un peu proche des principales stations réactives. Ces deux conditions ne sont pas remplies dans le cas de la région d'Assir. Pour juger si la déposition du césium 137 était faite par voie sèche ou par voie humide, il faut bien avoir des mesures concernant la contamination du couvert végétal naturel dans les années 1960 et l'année 1986, dans la mesure où les feuilles constituent un obstacle particulièrement efficace dans l'interception des dépôts secs du Césium 137 (Wicherek et al, 1993 ; Champion et al, 2006). Malheureusement, on ne dispose pas ce type de mesure de référence dans la zone d'étude. Autre condition qui pourrait avoir un effet direct sur l'activité différente du Césium 137, c'est l'hétérogénéité de la rugosité de la surface autour des sites de prélèvement, ce qui peut modifier la vitesse de dépôt sec en Césium 137 dans ce milieu riverain. Bien au contraire de l'hypothèse du vent, les précipitations changent très peu le long du transect de 123 mètres de long et de 64 mètres de large dans les 5 terrasses, pourtant l'activité du Césium 137 est très variable. De ce fait, il paraît probable que la variation de l'activité du Césium 137 enregistrée dans les différentes terrasses et le site de référence est attribuable à des facteurs autres que celui de la variabilité des précipitations. L'agrosystème, les modes d'exploitation, les pratiques agricoles traditionnelles, la salinité des eaux d'irrigation, le mode, la profondeur de labour du sol et les équipements et les aménagements urbains sont tous des facteurs susceptibles d'être à l'origine de l'actuelle distribution inégale du Césium 137 sur les deux plans vertical et latéral. Les résultats des

analyses isotopiques ont montré une claire augmentation graduelle de l'activité du Césium 137 qui se produisait à partir de la haute terrasse jusqu'à la terrasse inférieure autant large et étendue par rapport à celles situées sur la berge supérieure.

INTERPRETATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

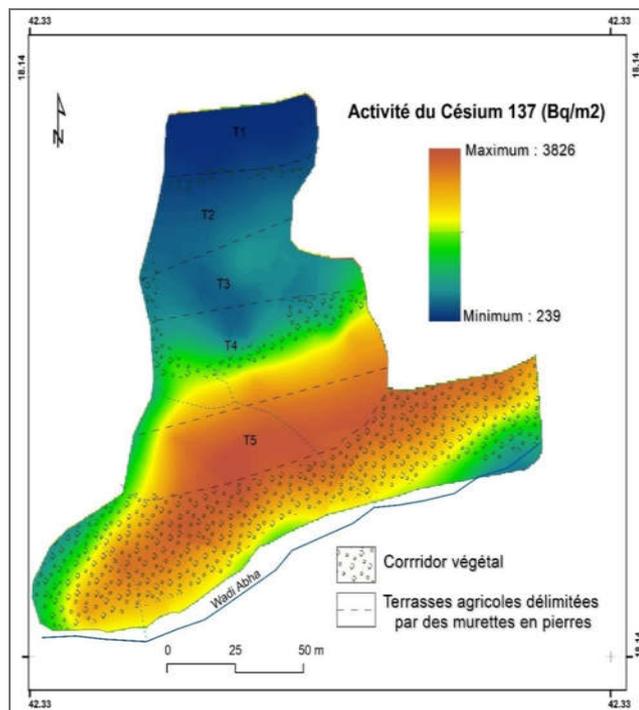
L'analyse des échantillons a montré des écarts considérables concernant l'activité surfacique rémanente du Césium 137 dans la couche du sol des terrasses agricoles. L'apparition des grandes disparités même à une petite échelle qui ne dépasse pas le 1.15 ha de superficie au total, laisse admettre l'hypothèse de transfert et de mobilité plus que l'hypothèse de la variation qui est liée à la nature de dépôt sec ou humide. L'activité du Césium 137 reste dépendante d'abord des quantités pluviométriques annuelles et aussi du comportement des particules fines du sol qui se détachent et se déplacent en suspension, surtout, lors des crues extrêmes (Vinet, 2007 ; Defosse, 2009, Mabit, Bernard, Laverdière et Wicherek, 1999, Felah, 2010, Azaiez, 2016 et al., 2021). L'interprétation de l'activité du Césium 137 n'est pas faite au regard de l'année de base 1963 ni par référence à l'accident de Tchernobyl 1986, faute de l'absence de mesures de référence concernant la zone d'étude, même pour toute la région d'Assir pour ces années. Cette exception est faite, bien que les quantités des pluies vers la fin du mois d'Avril et le début du mois de Mai 1986 ont été suffisantes pour expliquer les retombées du Césium 137 assez importantes suites de l'accident de Tchernobyl le 26 Avril 1986. Les quantités pluviométriques enregistrées entre 26 Avril et 8 Mai sont de 28.5 mm, bien qu'elles sont moins de la moyenne et qu'elles sont d'intensité modérée l'apport en Césium 137 était considérable (Champion et al, 2006) (Fig. 5).

Figure 5 - Répartition des précipitations mensuelles en 1986 dans la station d'Abha (Source : Traitement de données 1978-2018, Centre National de Météorologie)



En effet, ce premier essai expérimental qui a été opéré dans la zone d'étude vise principalement communiquer les nouvelles informations complémentaires et les principales conclusions relatives à la répartition spatiale du Césium 137 dans l'intention d'expliquer la dynamique des sédiments en suivant ce traceur isotopique (Fig. 6). C'est-à-dire que le taux d'activité très élevée du Césium 137 dans trois parcelles ne veut pas dire que ces dernières ont eu une déposition originelle significative et supérieure à celle enregistrée dans les parcelles juxtaposées grâce à la forte pluviosité, mais tout simplement parce que l'évolution de cet isotope n'était pas linéaire et homogène le long de toute la berge, ce qui traduit l'hétérogénéité des facteurs et des processus intrinsèques et extrinsèques, même sur une échelle très fine. De ce fait, l'interprétation doit faire intervenir en détail l'ensemble des phénomènes entrant en jeu dans cette répartition (Tab 1).

Figure 6 - Répartition de l'activité du Césium 137 dans les différentes terrasses agricoles situées sur la rive nord de l'oued Abha entre El Arine et Graiguer (Source : Géotraitement des résultats des analyses isotopiques sous Arc Gis).



Terrasse juxtaposée à la terrasse 5 (limite de lit mineur de l'oued Abha)	3826.9	Apport des pluies mais aussi des déplacement latéraux et verticaux des eaux de ruissellement et de l'écoulement hypodermique sur la berge. Elle constitue aussi la banquette de débordement ordinaire de l'oued Abha. Ce qui signifie son enrichissement permanent en éléments radioactifs du Césium 137 même en absence des pluies dans le secteur prélèvement parce que les particules de Césium 137 sont facilement acheminées avec les eaux turbides dans le chenal de l'oued.
Site stable	0° 45 m 1500	Site qui est resté à l'écart de tout fait d'anthropisation depuis plus de trois décennies.

Tableau 1 - Les caractéristiques des secteurs de prélèvement et les résultats de mesure du Césium 137 (Source : Image SRTM et les résultats des analyses isotopiques)

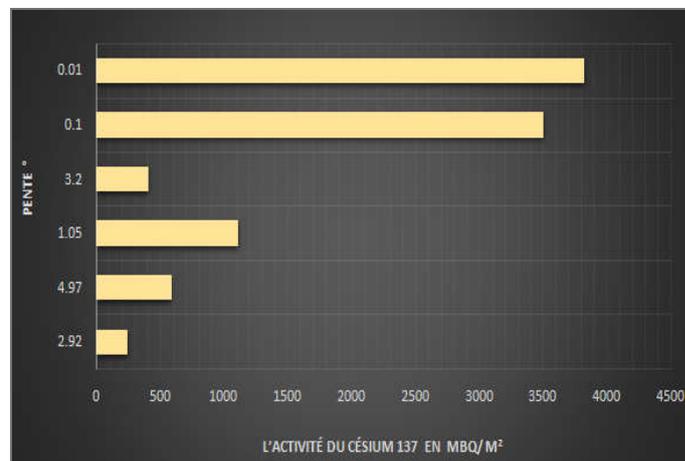
Terrasses agricoles	Pente en °	Extension en mètre	Activité du Cs 137 Bq/m²	Type d'apport en Césium 137
Terrace 1	2.95°	19.5	242.12	Apport des pluies et un faible déplacement latéral le long de la berge.
Terrace 2	4.97°	23.5	589.26	Apport des pluies et un faible déplacement latéral le long de la berge.
Terrace 3	1.05°	16.5	1114.76	Apport des pluies et un faible déplacement latéral le long de la berge.
Terrace 4	3.2°	12.5	407.9	Apport des pluies et un faible déplacement latéral le long de la berge.
Terrace 5	0.1°	24.75	3506	Apport des pluies et du déplacement latéral provenant de ruissellement.

Dans l'objectif d'une vérification des résultats en termes de cohérence, une comparaison a été faite entre la carte de l'activité de Césium 137 obtenue d'une part et la carte de la dégradation du sol et des processus érosif, faite sur la base de l'Image Google Earth Pro 2020, d'autre part (Tab 1 et Fig. 6).

VARIATION DE L'ACTIVITE DU CESIUM 137 EN FONCTION DE LA PENTE

Une observation minutieuse dans les conditions litho-topographiques montre bien que cette rupture est accompagnée d'un changement rapide dans la texture du sol d'une part et une rupture de pente d'autre part (Figs.7).

Figure 7 -Variation de l'activité du Césium 137 en fonction de la pente sur la berge nord de l'oued Abha entre El Arine et El Graiguer (Source : Résultats des analyses isotopiques de Césium 137, 2020)



Ces deux données peuvent apporter d'autres éléments de réponse pour expliquer cette dynamique locale des radio-isotopes du Césium 137 et pour mettre en lumière les facteurs et les microprocessus

géomorphologiques responsables du façonnage du paysage riverain aménagé en terrasses agricoles (Wicherek et al, 1993 ; Hamza, 1988 ; Nasri, 1995 ; Nasri, 2002 ; Azaiez, 2016 ; Azaiez, 2021). L'objectif principal c'est de prédire l'évolution future des différents facteurs et de savoir comment se comporteront les terrasses en cas de la prolifération de la crise climatique et la continuation des changements socioéconomiques (Nasri, 1995 ; Nasri, 2002 ; Azaiez, 2016 ; Azaiez, 2021).

COMPARAISON DE L'ACTIVITE DE CESIUM 137 ENTRE LES DIFFERENTES TERRASSES : (Figures 8-9-10-11-12 et 13)

La typologie faite en se référant à la position de la parcelle agricole par rapport à la berge n'est pas tout à fait satisfaisante pour expliquer l'activité inégale de Césium 137 dans la partie médiane de la berge. Une forte diminution du taux de Césium 137 dans la terrasse agricole 4 avec une activité de 407 mbq/cm² seulement par rapport à 1114.76 mbq/cm² dans la terrasse sus-jacente et 3506 mbq/cm² dans la terrasse sous-jacente. Cette perturbation au niveau de l'activité du Césium 137 implique la prolifération de nouveaux facteurs autres que les précipitations (McHenry et al, 1985 ; Ritchie et al, 1990 et 1993 ; Wicherek et al, 1993 ; Mabit et al, 1999, Porto et al, 2003 ; Al Katmour, 2004 ; Faleh 2010 ; Ben Mansour et al, 2000 et 2012 ; Azaiez,2016 ; Azaiez, 2021).

Figure 8 -Variation de l'activité du césium 137 en fonction de la profondeur dans la basse terrasse agricole sur la berge nord de l'oued Abha entre El Arine et El Graiguer (essai1) (Source : Résultats des analyses isotopiques de Césium 137, 2020)

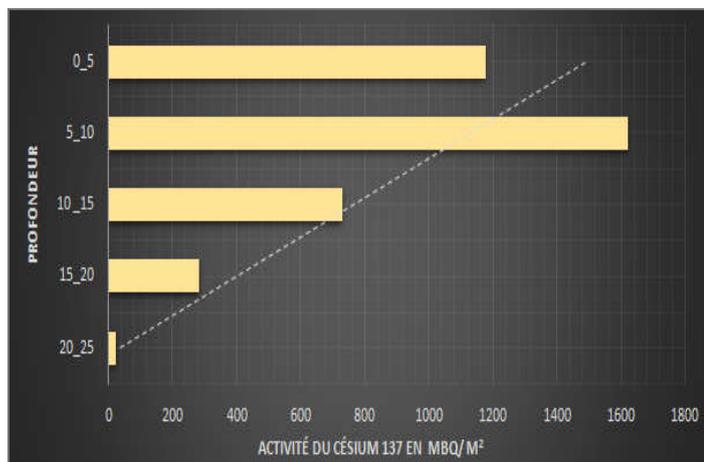


Figure 9 -Variation de l'activité du césium 137 en fonction de la profondeur dans la basse terrasse agricole sur la berge nord de l'oued Abha entre El Arine et El Graiguer (essai2) (Source : Résultats des analyses isotopiques de Césium 137, 2020)

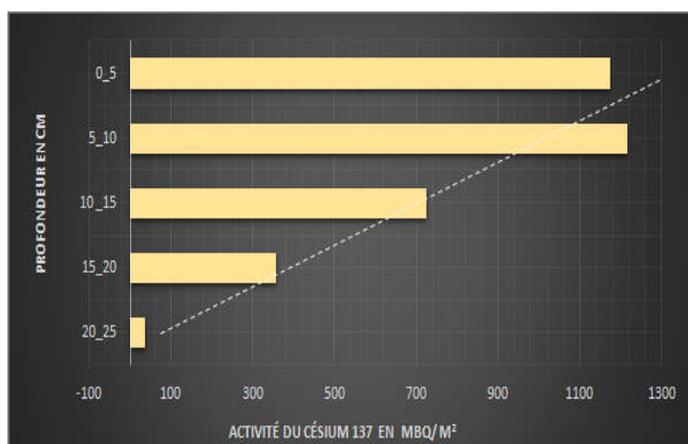


Figure 10- Variation de l'activité du césium 137 en fonction de la profondeur dans la haute terrasse agricole sur la berge nord de l'oued Abha entre El Arine et El Graiguer (Source : Résultats des analyses isotopiques de Césium 137, 2020)

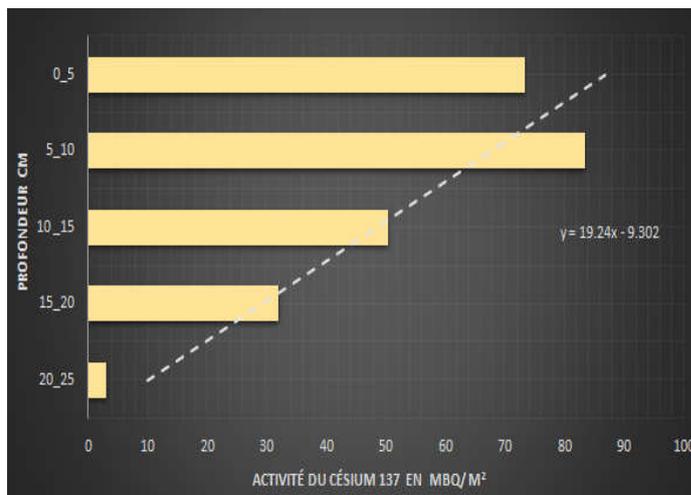


Figure 11- Variation de l'activité du césium 137 en fonction de la profondeur dans la deuxième terrasse agricole sur la berge nord de l'oued Abha entre El Arine et El Graiguer (Source : Résultats des analyses isotopiques de Césium 137, 2020)

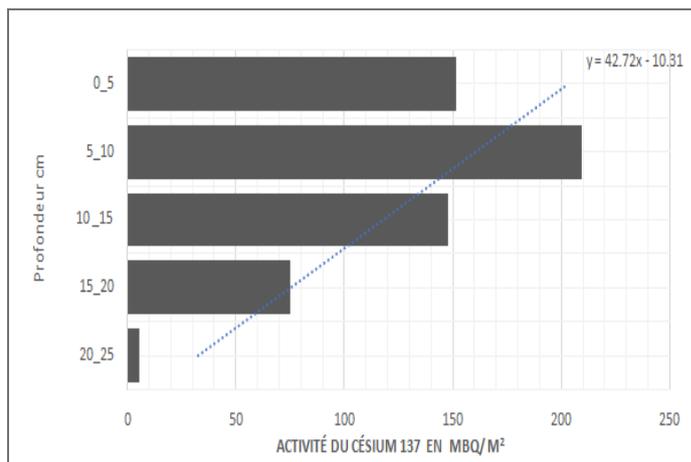


Figure 12-Variation de l'activité du césium 137 en fonction de la profondeur dans la troisième terrasse agricole sur la berge nord de l'oued Abha entre El Arine et El Graiguer (Source : Résultats des analyses isotopiques de Césium 137, 2020)

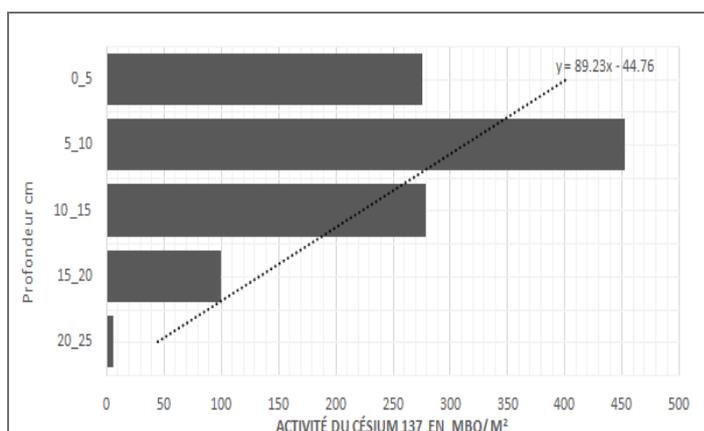
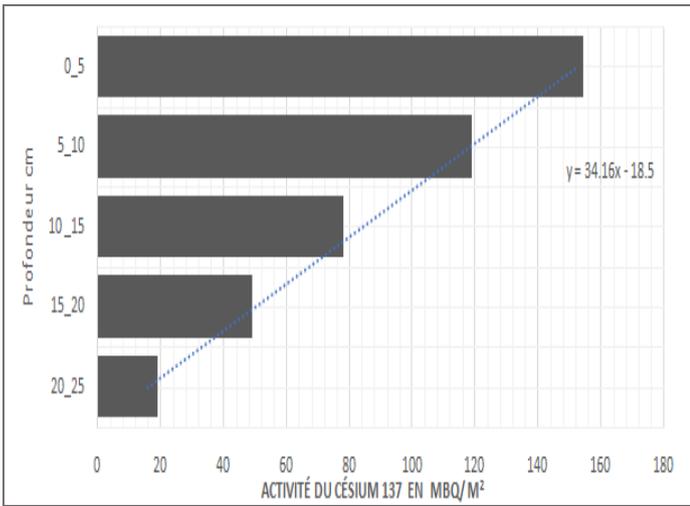


Figure 13 -Variation de l'activité du Césium 137 dans la quatrième terrasse agricole sur la berge nord de l'oued Abha entre El Arine et El Graiguer (Source : Résultats des analyses isotopiques de Césium 137, 2020)



La basse et quatrième terrasses agricoles concentrent beaucoup plus de Césium 137 dans la couche superficielle du sol qui est marquée par une texture très fine. Cette situation s'explique par la présence des argiles et des limons de débordement qui bloquent la circulation de l'eau et du Césium 137 et les empêchent de s'infiltrer en profondeur. Ainsi, l'activité du Césium 137 est devenue au fil des années de plus en plus importante à la surface. De ce fait, sa désintégration dans ces endroits est étroitement liée à la durée de vie du Césium 137 en lui-même, estimée de 30.2 ans où aussi aux différents processus de l'érosion mécanique (Wicherek et al, 1993, Mabit ; Bernard, Laverdière et Wicherek, 1999 ; Felah, 2010 ; Azaiez, 2016 ; al. ; Azaiez 2021).

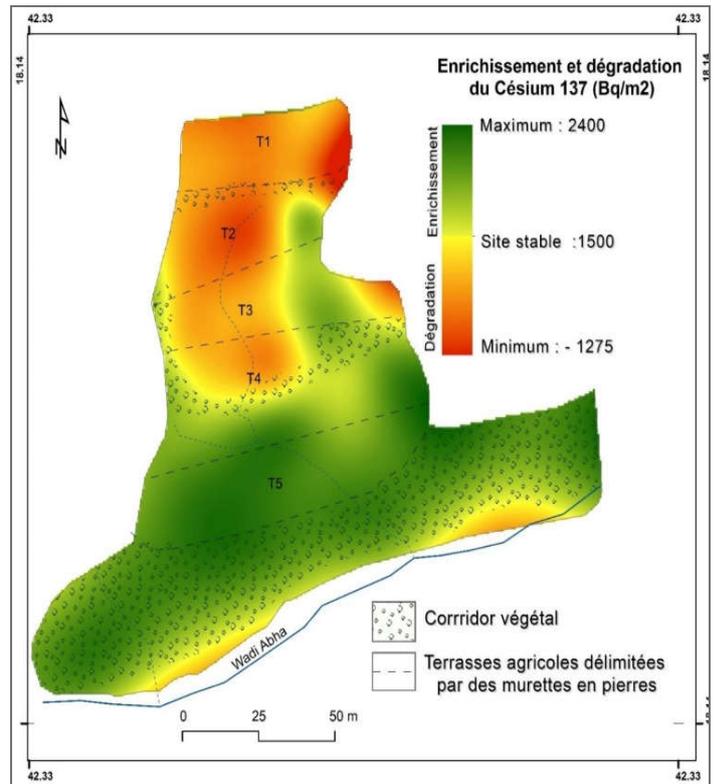
L'ENRICHISSEMENT ET LA DIMINUTION DU CESIUM 137 DANS LES DIFFERENTES TERRASSES DE L'OUED ABHA ENTRE EL ARINE ET EL GRAIGUER

En effet, l'enrichissement en Césium 137 était plus remarquable dans la basse terrasse qui a bénéficié d'un apport double en sédiments latéral et longitudinal (Fig. 14). Tandis que cet apport est considéré faible dans les hautes terrasses agricoles (1 et 2) de la berge nord de l'oued Abha parce que le transfert est généralement discontinu.

Les particules de Césium 137 ne se précipitent dans le sol pour être adsorbés par les éléments argileux fins qu'aux cours des pluies qui sont devenue de plus en plus rares (Fig. 14).

L'apport provenant de ruissellement diminue à son minimum parce qu'il est freiné d'abord par le tissu urbain, les canalisations des drains intra-urbains et aussi la tendance générale à la régression des précipitations dans la région d'Assir (Allaoua et Azaiez 2021 ; Azaiez et al, 2020). Dans le passé, les sols des terrasses ont fait la prospérité des civilisations anciennes et ont conduit à la subsistance du secteur agricole. Aujourd'hui, après le boom de l'urbanisation, le comportement du sol urbain et périurbain, certainement a été perturbé en fonction des différents types des aménagements urbains (infrastructure, canalisation souterraine, ponts, terrain bâti ...). Pourtant, le changement du paysage agraire n'a pas été aussi radicale que les changements intervenus dans les aspects internes des sols situés de part est d'autre de lit de l'oued Abha.

Figure 14 -l'enrichissement et la dégradation du Césium 137 dans les différentes terrasses agricoles par comparaison au site de référence (Source : Géotraitement des résultats des analyses isotopiques sous Arc Gis).



LE BILAN SEDIMENTAIRE DANS LA BERGE NORD DE L'OUED ABHA (EL ARINE - EL GRAIGUER)

Pour estimer le bilan sédimentaire en termes de perte ou d'accumulation, on a choisi d'appliquer le modèle proportionnel proposé par Kachanoski en 1993, qui est le plus approprié pour les terres à vocation agricole. (Kachanoski, 1993 ; Zapata, 2002 ; Felah, 2010 ; Azaiez, 2016 et al., 2021). Le calcul est effectué en comparant les inventaires de Césium 137 dans le sol des différentes terrasses agricoles avec le site stable, qui est plat et qui n'a pas été mis en culture depuis plus de trois décennies.

Le modèle proportionnel de l'estimation des pertes en terre s'exprime selon l'équation suivante : (Kachanoski, 1993 ; Zapata, 2002 ; Felah, 2010 ; Azaiez, 2016 et al., 2021)

$$Y = 10 \times \frac{B \times d \times X}{100 \times T} \quad [1]$$

Avec :

- Y= La perte en terre (t ha-1 an-1) ;
- D= Epaisseur de la couche de labour (m) ;
- B= densité du sol de la fraction < 0.2 mm kg m⁻³ ;
- X= Pourcentage d'enrichissement ou de réduction de l'activité du Césium 137 exprimée (Aref-A) /Aref×100) ;
- T= nombre d'années écoulées depuis le maximum de retombées (année 1963) et la date du prélèvement des échantillons (2019)
- Aref= L'activité activité spécifique en Césium 137 du site de référence en Bq/m² du Césium 137 dans le site de référence (Bq m⁻²) = (1500 Bq/m²pour la zone d'étude) ;

A = activité spécifique en Césium 137 de l'échantillon du sol en (Bq/m⁻²)

(Kachanoski, 1993 ; Zapata, 2002 ; Felah, 2010, Azaiez, 2016 et 2021).

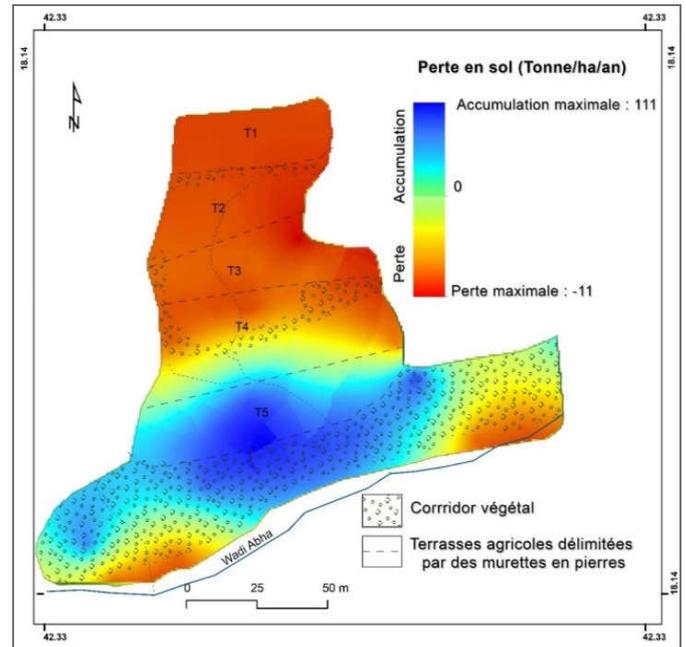
En effet, la carte des pertes en terre est considérée l'autre facette de la carte de l'activité du Césium 137. Les pluies apportent les mêmes quantités de éléments radioactifs dans les cinq terrasses étudiées, mais en arrivant au sol, ces éléments subissent une redistribution sous l'influence des facteurs et des microprocessus très compliqués. Ainsi, les secteurs ayant connus une diminution dans l'activité de Césium 137 sont les secteurs qui ont enregistré les pertes du sol les plus fortes. Ces pertes varient de 1 tonne/ha/an dans les secteurs les plus stables jusqu'à 11 tonne /ha/an dans les endroits les plus touchés par l'érosion. Tenant compte la perte spécifique qui est de l'ordre de 5.5 tonne /ha/an, elle est considérée parmi les plus faibles à l'échelle mondiale et régionale.

Ces Résultats confirment que la zone d'étude est dans la première phase de dégradation, ainsi les chances de sa préservation et de sa mise en valeur sont encore possibles, beaucoup plus tangibles et à la portée de la population et des intervenants locaux. Ceci montre la bonne efficacité des terrasses agricoles dans la préservation des sols depuis des siècles. Mais la mobilité du Césium 137, prouvée par les analyses, est considérée comme signe d'alerte du début de rupture d'un équilibre qui a duré des siècles. Ces résultats préliminaires donnent un appui aux jeunes chercheurs afin d'explorer les problèmes directes et indirectes qui résident derrière ces changements. L'interprétation de la manifestation implicite de l'érosion hydrique pourra éclairer des nouvelles pistes de recherche pour optimiser la fonctionnalité des terrasses agricoles et augmenter leur résilience dans les prochaines années à travers des pratiques agricoles plus appropriées (Nasri, 1995 ; Nasri, 2002 ; Zhang X.C, 1999 et 2015).

Une petite comparaison entre la carte de répartition de puits d'irrigation en 2004 et 2021, il s'est avéré que le nombre des puits d'irrigation a été doublé au bout d'une vingtaine d'années. Ce passage d'une culture artisanale basée sur la rétention des eaux pluviales à l'intégration d'un système de cultures conduites en irrigué ne peut pas être sans effets sur la macroporosité structurant les agrégats du sol et par la suite sur le fonctionnement des terrasses agricoles. (Hamza, 1988 ; Nasri, 1995 ; Nasri, 2002 ; Halaire et al., 1998, Azaiez, 2016 ; Azaiez, 2021). La caractérisation des mottes du sol et de sa porosité nécessite un grand travail colossal basé sur des essais de densimétrie à des échelles fines (Halaire et al., 1998) pour étudier les propriétés favorisant la dégradation des terres.

Les terrasses agricoles préservent encore leur dimension patrimoniale et elles constituent un élément clé dans la préservation du sol sur les versants et les berges des cours d'eau de toute la région d'Assir. Elles garantissent un certain équilibre entre les agents de la morphogenèse et les processus de la pédogenèse (Tricart, 1971). Mais, on ne savait pas toujours dans quelle mesure ces sols garderont encore le même potentiel de renouvellement, parce que ces sols urbains ont fait l'objet de moins d'investigation en termes de recherche et d'analyse (Mhiri, Tahrouni, Hachicha et Lebdi 1998 ; Park, 2009). On ne dispose que des connaissances et des données générales concernant leurs caractéristiques physico-chimiques et qui semblent insuffisantes pour mener une interprétation solide et prometteuse pour étudier la vulnérabilité des terrasses agricoles urbaines et pour quantifier leur perte en terre.

Figure 15- Carte de la perte en sol dans les terrasses agricoles situées sur la rive nord de l'oued Abha entre El Arine et Graiguer (Source : Géotraitement sous Arc Gis des résultats des analyses isotopiques du Césium 137 et le calcul des pertes en sols à travers le modèle proportionnel).



Il faut mentionner que les secteurs riverains, même ceux qui sont bien végétalisés ne présentent pas de signes visibles et graves d'érosion hydrique. Dans la basse terrasse agricole, des pellicules successives additionnelles viennent de s'ajouter au profil d'origine du sol après chaque crue (Tricart, 1973) et au niveau de la haute terrasse les sols continus à se développer en profondeur sous l'effet de la météorisation qui se traduit par une différenciation de ses horizons (Tricart, 1973). De ce fait, les terrasses agricoles du méandre El Arine - Graiguer sont loin d'être des zones manifestement érodées et instables, mais le problème de dégradation est un fait latent confirmé par l'activité trop variable du Césium 137. Ainsi, le sujet de l'érosion doit être discuté comme étant une hypothèse possible dans le futur. Ce paradoxe et cette contradiction suscitent un fait érosif qui se prépare implicitement à long terme si la société paysanne et les acteurs locaux ne prennent pas les mesures nécessaires pour résorber le déficit hydrique engendré par les changements climatiques et réduire les pertes en terres. Il conviendrait alors s'appuyer sur cette dynamique des radio-isotopes Césium 137 afin de justifier la présence des processus internes qui exercèrent une influence implicite mais importante sur le sol. Ce qui pourrait entraîner des répercussions néfastes et défavorables sur le paysage agraire assirien à long terme. Cette dynamique pourra prendre plus d'ampleur si le transfert implicite s'amplifie avec le temps et sous l'effet de la prolifération de certains phénomènes hydrologiques discrets comme l'écoulement hypodermique qui peut évoluer à l'occasion des pluies torrentielles en trous de suffusion et en ravinement. La mise en place d'un référentiel des sols urbains propre à la région d'Assir pourra faciliter la tâche des géomorphologues dans l'explication et le suivi de la dégradation des ressources édaphiques dans certaines terrasses et dans la stabilisation des versants.

CONCLUSION

Arrivant au terme de cette recherche, Le suivi des traceurs isotopiques de Césium 137 et ses différentes applications dans le domaine environnemental et la gestion des ressources en sol, demeure une technique innovatrice et prometteuse (McHenry et al, 1985 ; Ritchie et al., 1990 et 1993 ; Wicherek et al, 1993 ; Mabit et al,

1999, Porto et al., 2003; Al Katmour, 2004; Faleh 2010; Ben Mansour et al, 2000 et 2012; Azaiez, 2016; Azaiez, 2021). Elle permet d'expliciter les microprocessus responsables de la modification du fonctionnement de système de terrasses agricoles (Nasri, 1995; Nasri, 2002). Les résultats préliminaires obtenus de la modélisation de l'activité du Césium 137 et de la mobilité des sédiments n'ont du sens que pour démontrer qu'il existe une microdynamique interne qui est en train de s'amplifier en modifiant la consistance des éléments du sol. Cette situation est probablement liée à une utilisation accrue des eaux saumâtres suite de la raréfaction des ressources en eau pluviales pendant ces dernières décennies (El Qahtani et al., 2019; Allaoua et Azaiez, 2021). De ce fait, et à cause de la prédominance des sols à texture fine très peu perméables, le sol de ces terrasses agricoles n'arrive pas à se débarrasser définitivement des Selles par infiltration notamment dans l'horizon d'altération en contact avec les anciennes roches basaltiques et granitiques. Des concrétions pierreuses sont en cours de formation suite de l'augmentation de l'évaporation. Malgré l'absence des signes externes d'une érosion mécanique grave, la diminution de l'activité du Césium 137 dans certaines terrasses confirme l'hypothèse d'une détérioration des propriétés fonctionnelles du sol qui sont certainement influencées par la diminution de la biodiversité, de la perméabilité réduite et de la faible porosité (Mhiri, Tahrouni, Hachicha et Lebdi, 1998). Une bonne partie du Césium 137 est probablement partie de deux premières terrasses en haut de la berge après débordement et sous l'effet de la forte pente, mais aussi des infiltrations dans les premiers horizons du sol sableux. De plus, ce système de terrasses agricoles dans un milieu urbain est devenu basé sur la rétention des eaux de surface et des eaux de drainage de plus en plus polluées et à cause de la faible perméabilité, les sels et les polluants finissent par atteindre que partiellement la nappe. Tandis que les éléments non évacués se concrétisent et s'accumulent en surface et traumatise le fonctionnement du système hydro-pédologique normal du sol (Mhiri, Tahrouni, Hachicha et Lebdi, 1998; Barthès et al., 1998). Ce système hydro-pédologique du méandre de l'oued Abha qui englobe le sol et le sous-sol avec toutes leurs composantes et qui sont en interaction continue, est marqué par un transfert latéral des éléments fins et ceux en solution (Mhiri, Tahrouni, Hachicha et Lebdi, 1998; Barthès et al., 1998). Les résultats des analyses isotopiques des terrasses agricoles ont permis de faire une quantification des pertes en terre très peu fiables et précises, parce que le site de référence choisi a été caractérisé par une stabilité à partir de 2001. Mais avant cette date, on ne savait pas avec exactitude si cette stabilité remonte vers les années 1960, qui correspondent au début des essais nucléaires ou non. Raison de plus, l'absence des études régionales sur l'ensemble du pays laisse place pour ces incertitudes associées à la cartographie des pertes en terre dans ces terrasses agricoles du cours moyen de l'oued Abha.

FUNDING:

The author is funded through the Small Research Groups from the Deanship of Scientific Research at King Khalid University under research grant number (RGP. 1/235/1442)

ACKNOWLEDGEMENTS:

The author wishes to extend his appreciation and his gratitude to the Deanship of Scientific Research at King Khalid University Saudi Arabia for providing administrative and technical support and for funding this work through General Research Project (Small Research Groups) under grant number (RGP. 1/235/1442).

REFERENCES

- Al Karkouri, J., Watfeh, A., et Aderghal, M. (2002).** Technique de conservation de l'eau et des sols dans une zone semi-aride méditerranéenne du Rif central (vallée de Béni Boufrah), Bulletin réseau érosion n° 21, pp 101-114. - Al Katmour (H), 2004, Les changements spatiaux et leurs influences sur la dynamique actuelle dans le bassin versant de Tkikira (L'Atlas Central au Maroc), Thèse de Doctorat, 327 p
- Al Katmour, H., (2004).** Les changements spatiaux et leurs influences sur la dynamique actuelle dans le bassin versant de Tkikira (L'Atlas Central au Maroc), Thèse de Doctorat, 327 p (en arabe).
- Al-Gharib, I., (2008).** Cesium 137 and the Natural Radioactive Isotopes in the Sediments of Lake Zarzar in Syria, ABHATH AL-YARMOUK, Yarmouk University Publications Deanship of Research and Graduate Studies, Vol. 17 No. 1C, 2008, p 77 93.
- Ali, K.K., Mutlaq, D.A. and Abdullah H. M., (2015).** Determination concentrations of cesium -137 in soil and aerosol of city of Ramadi and surrounding areas and the radiation doses caused by inhalation, Iraqi Journal of Science; Vol 15, N° 3, p 2321-2328.
- Allaoua, A. et Azaiez. N., (2021).** Mapping of Flood Zones in Urban Areas through a Hydro-climatic Approach: The Case of the City of Abha, Earth Science Research; Vol. 10, No. 2; 2021, doi:10.5539/esr.v10.n2.22 p.
- Aubert, G., (1986).** Réflexion sur l'utilisation de certains types de banquettes, DRS en Algérie. Cahiers de l'ORSTOM Série Pédol. Vol. XXII (2) 147-151p.
- Azaiez, N. (2021).** Improved Modelling of Soil Loss in El Badalah Basin: Comparing the Performance of the Universal Soil Loss Equation, Revised Universal Soil Loss Equation and Modified Universal Soil Loss Equation Models by Using the Magnetic and Gravimetric Prospection Outcomes. Journal of Geoscience and Environment Protection, 9, 50-73. <https://doi.org/10.4236/gep.2021.94005>.
- Azaiez, N., Alleoua, A., Baazaoui, N. and Qhtani, N., (2020).** Assessment of Soil Loss in the Mirabah Basin: An Overview of the Potential of Agricultural Terraces as Ancestral Practices (Saudi Arabia). Open Journal of Soil Science, 10, 159-180.
- Azaiez, N. (2020).** Modelling the Soil Loss in the Watershed of the Chaddad Wadi in terms of Both Rockiness and Soil Slaking Indexes. International Journal of Geosciences, 11, 100-124. <https://doi.org/10.4236/ijg.2020.113007>
- Azaiez, N., Alleoua, A., (2021).** Estimation de la Perte en sol par L'application du Modèle EPM « Erosion Potential Method » Cas du Bassin Versant de l'oued El Hroub (Jizān, Arabie Saoudite), European Journal of Scientific Research 159(Numéro 3):81-103
- Azaiez, N., (2020).** soil erosion measurement using fallout cesium 137 technique in Sidi Salah basin (Eastern Central Tunisia), GeoProgress Journal, vol. 7, i. 1, 2020 - Ed. Geoprogress, p 11-35.
- Azaiez, N., (2016).** The Current Geomorphological Dynamics in the Watershed of Wadi ElMelah Bou ElAjraf, Eastern Central Tunisia. Cartography and Quantification Test of Water Erosion. Doctoral Thesis, Faculty of Humanities and Social Sciences of Tunis, 247 p.
- Barthès, B., Albrecht, A., Asseline, J., DeNoni, G., Roose, E., et Viennot, M., (1998).** Pratiques culturelles et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron), Étude et Gestion des Sols, 5 (3), p. 157-170, 1998.

- Ben Mansour, M., Ibn majah, M., Marah, H., Marfak, T., et Walling, D., (2000).** Use of the Cs137 technique in soil erosion investigation in Morocco-case study of the Zitouna basin in the north. In: October 16th–20th, Proceeding of an International Symposium on Nuclear Techniques in Integrated Plant Nutrient, Water and Soil Management. AIEA/FAO, Vienna, pp. 308–315.
- Ben Mansour, M., Zouaghi, A., Amenzou, N., Nouira, A., Sabir, M., Ben Jelloun, H., Marah, H. et Ben Kadad, A., (2012).** Application de la technique de 137Cs à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Moulay Bouchta, Rif occidental, Maroc, Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et végétales, pp 53-58.
- Bernard, C., Mabit, L., Laverdière, M.R., Wicherek, S., (1998).** Césium¹³⁷ et érosion des sols. Cahiers Agric. 7:179–186.
- Bernard, C., Laverdière, M.R., (1992).** Spatial redistribution of Cs¹³⁷ and soil erosion on Orléans Island, Québec. Can. J. SoilSci. 72 :543–554. Bernard, C., Laverdière, M.R., Pesant, A.R. 1992. Variabilité de la relation entre les pertes de césium et de sol par érosion hydrique. Geoderma52 :265–277.
- Champion. D., Renaud. Ph., Metivier. J-M., (2006).** Analyse de cohérence et de sensibilité des différentes approches de reconstitution des dépôts de 137cs en France consécutifs à l'accident de Tchernobyl – Rapport de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, DEI n° 2006-01, 30p.
- Defossez, S., (2009).** Évaluation des mesures de gestion du risque inondation. Application au cas des basses plaines de l'Aude, Thèse de l'Université Montpellier III, Paul-Valéry, 462 p.
- El Atta, H.A. and Aref, I. (2010).** Effect of Terracing on Rainwater Harvesting and Growth of Juniperus proceraHochst. ex Endlicher. International Journal of Environmental Science and Technology, 7, 59-66. <https://doi.org/10.1007/BF03326117>.
- El Qahtani, S., et al. (2019).** Climate Change and its Effect on Temperature and Precipitation. Institute for Research and Consulting Studies and Agriculture and Water Authority, 110.
- Felah, A., (2010).** L'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion des sols dans le Rif Central (Exemple : bassin versant Aknoul), Publication : Association TatouanAsmir, 183 p (En Arabe).
- Felah, A., (2010).** Le radionucléide Césium137 et la quantification de l'érosion hydrique dans le bassin versant d'oued Merkat de l'avant pays du Rif central, Revue Géographique du Maroc, pp 74-89.
- Halaire, V., Hachicha, M. et Cheverry, C., (1998).** Evolution structurale d'un horizon de surface argileux sous irrigation (KalaâtLandelous, Tunisie) : caractérisation de la macroporosité par analyse d'image, Étude et Gestion des Sols, 5 (2), p 107-116.
- Hamza, A., (1988).** Erosion et lutte anti-érosive dans le bassin versant d'oued Zroud (Tunisie centrale), de l'approche exogène à la stratégie technico-paysanne, thèse de doctorat d'état, Univ Strasbourg 3 volumes, 1191 p.
- Kachanoski, R.G., (1993).** Estimating soil loss from changes in soil Cesium137. Canadian Journal of Soil Science, n °73, pp 515–526.
- Mabit, L., Bernard, C., Laverdière, M.R., (2007).** Assessment of erosion in the Boyer River watershed (Canada) using a GIS oriented sampling strategy and 137Cs measurements. Catena 71:242–249.
- Mabit, L., Bernard, C., Laverdière, M.R., Wicherek, S., (1999).** Assessment of water erosion in a small agricultural basin of the St. Lawrence River watershed. Hydrobiologia410 :263–268.
- Mabit, L., Bernard, C., Laverdière, M. R, Wicherek, S., (1998).** Spatialisation et cartographie des risques érosifs à l'échelle d'un bassin versant agricole par un radio-isotope (137Cs), Étude et Gestion des Sols, 5 (3), p. 171-180, 1998.
- McHenry, J.R. et al, (1985).** Field erosion estimated from Cesium 137 activity measurements. Transactions of the ASAE 28, pp 480-483.
- Mhiri, A., Tahrouni, J., Hachicha, M. et Lebdi. F., (1998).** Approche systémique des risques de salinisation par endoréisation anthropique, Étude et Gestion des Sols, 5 (3), p. 257-268, 1998.
- Nasri, S., (1995).** Cartographie et évaluation des risques de l'érosion hydrique dans le bassin versant d'oued Ettieur (Tunisie Centrale), Mémoire de F.E, Option conservation des eaux et des sols, 170 p.
- Nasri, S., (2002).** Impact hydrologique des banquettes sur les apports liquides et solides dans les lacs collinaires en zones semi-arides de la Tunisie, INGREFF, in Bulletin Réseau Erosion n° 21, pp 115-129.
- Park, S.J., (2009).** Anthropogenic influence of urban development on the soil nitrogen fixing bacteria, nematode community, and nutrient pools. The Ohio State University, 166 p.
- Porto, P., Walling, D., Ferro, V. and Di Stefano, C., (2003).** validation erosion rate estimates provided by caesium-137 measurements for two small forested catchments in calabria, southern italy, Land degradation and development, volm 14: pp 389–408, (2003).
- Ritchie, J.C. et McHenry, J.R., (1990).** Application of Radioactive fallout Cesium-137 for Measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns, A review.J. Environ. QUAL. VOL 19, pp 43-72.
- Sean, J., Bennett, Andrew Simon, (2004). Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology, American Geophysical Union, 282p.
- Sylvie Roussel-Debet, (2006).** Les essais atmosphériques d'armes nucléaires : une pollution radioactive à l'échelle planétaire, Fiches information, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), 13p.
- Sylvie Roussel-Debet, (2008).** Les essais atmosphériques d'armes nucléaires : des retombées radioactives à l'échelle planétaire, Fiches information, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), 23 p.
- Tricart J., (1971).** Les études géomorphologiques pour la conservation des terres et des eaux. L'environnement. Paris : CIHEAM, 1971. p. 94-99 (Options Méditerranéennes ; n. 9).
- Tricart J., 1973,** La géomorphologie dans les études intégrées d'aménagement du milieu naturel. In : Annales de Géographie, t. 82, n°452, 1973. pp. 420-453 ; doi : <https://doi.org/10.3406/geo.1973.18905>
- Vinet, F., (2007).** Approche institutionnelle et contraintes locales de la gestion du risque. L'exemple des crues torrentielles en Languedoc-Roussillon. HDR, Université Paul-Valéry, Montpellier III, volume 3, 270 p.
- Wicherek, S., Veyret, Y., Bernard, C., (1993).** L'utilisation du césium 137 pour la connaissance de la dégradation du sol. Mém. Soc. géol. Fr. 162 : 261-268
- Zapata, F., (2002).** Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, Kluwer Academic publishers, 219 p.
- Zhang, X.C., (2015).** New Insights on using Fallout Radionuclides to Estimate Soil Redistribution Rates, Soil Science Society of America Journal, 79(1).
- Zhang X.C., (1999).** Rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strips: evidence from caesium-137 measurements, Catena, 36, pp. 115-142.