



L'érosion hydrique dans les oliveraies de la Sierra Magina. Perspectives pour un développement durable.

Jean-Louis Ballais

► To cite this version:

Jean-Louis Ballais. L'érosion hydrique dans les oliveraies de la Sierra Magina. Perspectives pour un développement durable.. El Olivar : Paisaje, Patrimonio y Desarrollo Sostenible - Edicion de las Actas del Seminario Hispano-Franés, 2009, Bedmar, Espagne. pp.117-139. hal-01571039

HAL Id: hal-01571039

<https://amu.hal.science/hal-01571039>

Submitted on 1 Aug 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



El Olivar: **Paisaje, Patrimonio y** **Desarrollo Sostenible**

Edición de las Actas del Seminario Hispano-Francés

L'érosion hydrique dans les oliveraies de la Sierra Mágina. Perspectives pour un développement durable

Jean-Louis Ballais

“UMR ESPACE-Université de Provence”

INTRODUCTION

Dans le cadre du programme du MEEDDAD français «Paysages et développement durable», l'érosion hydrique a été étudiée dans les oliveraies andalouses de la province de Jaén (Fig. 1), à la périphérie de la Sierra Mágina, spécialement sur le territoire de la commune de Bedmar (Fig. 2). L'oléiculture y est devenue récemment une véritable monoculture (Araque Jimenez, 2007; Moya, 2009; Cohen, 2009), occupant y compris les nombreuses pentes fortes et les longs versants convexes où des formes d'érosion hydrique ont récemment attiré l'attention (Araque Jimenez, 2007). La reconnaissance et l'inventaire des formes d'ablation et d'accumulation ont permis de choisir ensuite les



Photo 1: Carte de localisation

lieux de mesure et les points de prélèvement des échantillons nécessaires à la quantification de l'érosion hydrique.



Photo 2: Environs de Bedmar

1. LA MISE EN ÉVIDENCE DE L'ÉROSION DES SOLS : L'OBSERVATION DES FORMES :

L'étude de l'érosion hydrique dans les oliveraies a commencé par l'observation des formes caractéristiques de cette érosion, le plus souvent bien visibles quand elles sont générées par le ruissellement concentré.

1.1. L'absence locale de formes :

Les formes d'érosion hydrique sont absentes sur les glacis couverts et dans les colluvions caillouteuses. Là, si la densité des cailloux favorise le ruissellement (Bunte et Poesen, 1993), en revanche, elle diminue l'importance de l'ablation.

1.1.1. Sur glacis couvert

Les glacis, formes concaves, taillées dans des roches meubles et se raccordant au versant, à l'amont, sont très fréquentes en domaine méditerranéen. Ils sont le plus souvent fossiles. Par leur régularité de l'amont vers l'aval, leur forme est très favorable au ruissellement. Cependant, l'infiltration, très forte dans les couvertures caillouteuses épaisses souvent de plusieurs mètres, contrebalance largement l'effet de la pente.

Les glacis d'ubac présentent les caractéristiques les plus défavorables à l'apparition et au développement des formes d'érosion hydrique car leur bilan hydrique est le meilleur; c'est ce qu'on observe, par exemple, au Cortijo de la Tuja (Photo 1) où même la plantation de jeunes oliviers n'a pas provoqué la moindre apparition de griffes ou de rigoles.



Photo 3: Glacis d'ubac de Cortijo de la Tuja (cliché Jean-Louis Ballais)

Les glacis d'adret, plus secs, présentent néanmoins les mêmes caractéristiques (Photo 2).



Photo 4: Glacis d'adret de Cortijo de la Tuja (cliché Jean-Louis Ballais)

1.1.2. Sur colluvions caillouteuses

Les colluvions caillouteuses sont des formations constituées par les débris de fragmentation des roches cohérentes (calcaires et dolomies) des hauts de versant, étalées en contrebas par plusieurs processus morphogéniques, en particulier le ruissellement diffus. Leur grande perméabilité leur permet, par exemple dans le bassin versant de Calderon à Bedmar (Photo 3), de jouer le même rôle inhibiteur de l'érosion hydrique que les couvertures grossières des glacis.

A l'exception de ces rares formes et formations, la règle générale est l'absence de sol.



Photo 5: Colluvions caillouteuses de Calderon (cliché Jean-Louis Ballais)

1.2. L'absence générale de sols

Le plus souvent, ce qui frappe l'œil, c'est que la surface topographique prend une teinte très proche de celle de la roche, ce qui signifie que les sols, de teinte beige à brun sombre, ont déjà tous disparus sous l'effet de l'érosion hydrique. C'est donc par excès de langage qu'on parle ici d'érosion des sols : en fait, c'est la roche en place, ou les formations superficielles, qui subissent actuellement une ablation.

L'ablation, c'est-à-dire l'enlèvement de matériel, se marque par une hiérarchie de formes en creux de plus en plus volumineuses, depuis les griffes jusqu'aux lits des rivières.

1.2.1. Les griffes sur marnes en pente convexe

Les griffes, formes élémentaires discontinues, s'observent fréquemment, sur les marnes du substratum modelées en pente convexe. Elles passent très vite à des rigoles continues, longues de plusieurs décimètres ou plusieurs mètres (El Calvario à Albalchez de Magina, Cortijo de Anito à Belmez de la Moraleda, etc.).

1.2.1. Les rigoles discontinues sur marnes en pente convexe

Ces rigoles constituent une forme d'érosion progressive, c'est-à-dire qu'elles s'entaillent par suite de la concentration du ruissellement diffus, à l'amont. Elles s'observent tout particulièrement sur les ruptures de pente convexe, à l'aval desquelles elles disparaissent très vite, parfois en formant un minuscule cône surbaissé (Photo 4). Localement, la suffosion peut se combiner à ces rigoles en leur donnant un aspect ganglionnaire.



Photo 6: Rigoles discontinues d'El Calvario (cliché Jean-Louis Ballais)

1.2.2. Les rigoles continues sur marnes

Plus à l'aval, en général, s'entaillent des rigoles continues qui se raccordent à des formes plus importantes à l'aval; il s'agit alors de formes d'érosion régressive, c'est-à-dire dont le moteur est constitué par l'entaille des drains principaux. Au cours du temps, cette entaille gagne vers l'amont du versant.

1.2.3. Les ravineaux et ravines sur marnes

Ces formes, plus profondes : moins de 30 cm environ pour les ravineaux, plus pour les ravines (et jusqu'à 2 m dans le cas du « ravin de Matias » de Cortijo de Mahoma (Photo 5) constituent les talwegs élémentaires sur les versants ou, déjà, à l'intersection des versants. Formes d'érosion hydrique régressive, elles se raccordent aux ruisseaux auxquels elles apportent, lors de leurs crues, la totalité ou une partie de l'eau et des alluvions transportées par les formes plus réduites d'amont. Plusieurs d'entre elles (Cortijo de Anito, Cortijo de Mahoma) font déjà l'objet d'interventions humaines importantes.



Photo 7: Ravin de Matias » (cliché Marianne Cohen)

1.2.4. La question fondamentale des connexions

Dans la perspective de la lutte contre l'érosion hydrique et, encore plus, de celle du développement durable, une question fondamentale est de savoir si les alluvions enlevées aux versants par les griffes, les rigoles, les ravineaux et les ravines sont simplement déplacées de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou emportées définitivement plus à l'aval, perdues, en quelque sorte, pour le bassin

versant. Il est donc nécessaire d'examiner le rôle des ruisseaux et des rivières dans cette exportation de matériaux.

1.2.4.1. Le rôle des ruisseaux

Comme dans tout le domaine méditerranéen et sauf exception, il s'agit de cours d'eau intermittents qui ne fonctionnent régulièrement que pendant la saison des pluies. Ce fonctionnement, d'ailleurs, est loin d'être naturel, en raison du fort impact des aménagements. On peut ainsi distinguer des réseaux hydrographiques « naturels » plus ou moins anthropisés, et des réseaux anthropiques.

1.2.5.1.1. Les réseaux « naturels » plus ou moins anthropisés

C'est le cas des ruisseaux axiaux drainant un fond de vallée étroit, non cultivé, à peine aménagé, comme au Cortijo de La Tuja. Les transferts de matériaux ne sont pas vraiment perturbés, de l'amont à l'aval, mais l'entaille reste réduite, grâce aux cailloutis du fond du lit et la connexion avec les rivières se fait sans problème.

1.2.5.1.2. Les réseaux « anthropiques »

Dans le cas des vallons larges, peu encaissés car entaillés dans des marnes ou des colluvions marneuses, cultivés, comme à Calderon, le tracé longitudinal peut être rectifié, le fond du lit curé et aménagé en petits barrages rustiques pour tenter de bloquer la progression de l'érosion régressive.

Certains de ces ruisseaux n'atteignent la rivière principale qu'au moment de leurs crues; l'essentiel du dépôt de la charge se fait alors par un cône aplati qui progresse sur une terrasse alluviale ou le lit majeur de cette rivière.

1.2.5.2. Le rôle des rivières

Les rivières exportent une partie du matériel alluvial reçu vers le rio Guadalquivir. C'est très visible sur le rio Cuadros-Bedmar, qui draine le nord de la Sierra Mágina : à sa sortie de la montagne, ses eaux sont très claires au printemps, alors que 5 kilomètres

en aval, quand il passe sous la route A-320, ses eaux sont très boueuses après les pluies du printemps 2008.

2. LA QUANTIFICATION

La quantification de l'ablation, du transport et du dépôt des alluvions a été effectuée en fonction des contraintes et des possibilités données par le programme de recherche. C'est ainsi qu'il a fallu renoncer à des mesures en continu, ou après chaque épisode pluvieux potentiellement érosif, faute de personnel permanent et d'appareils de mesure sur le terrain. Nous avons donc utilisé trois méthodes complémentaires : la mesure des entailles à partir d'aménagements datés, la datation des dépôts par leur contenu archéologique et la détermination du sens et de la valeur de l'évolution de la surface topographique par la méthode du ^{137}Cs .

2.1. A partir d'aménagements datés

Dans ces secteurs agricoles récents, les aménagements datés utilisables sur les versants sont peu nombreux. C'est ainsi que dans le cas de l'*asequia* inférieure du bassin versant de Calderon, un ravin affluent a creusé de quelques décimètres sous le conduit cimenté. Fort heureusement, la mise en place récente de l'irrigation au goutte à goutte a fourni plusieurs repères. Par exemple, à Cortijo de Mahoma, le long de la route Bedmar – Ermita de Cuadros, un ravineau s'est entaillé de 30 cm depuis la pose du tuyau d'irrigation. Le cas le plus spectaculaire est représenté par le « ravin de Matias » qui draine une partie du Cortijo Mahoma depuis la route A-320 près des ruines de Vereda et qui se jette dans l'Arroyo del Salado, affluent du rio Cuadros-Bedmar : dans la partie moyenne de son cours, l'entaille, depuis l'installation des tuyaux, reste modérée, de l'ordre de 30 cm, mais, vers l'aval, avec l'accélération de la pente convexe, elle dépasse légèrement 1 m en un point, et atteint même jusqu'à 1,12 m!

Les rivières offrent plus de possibilités de mesure, grâce aux ponts qui les franchissent. Dans ce cas, l'incertitude réside dans l'âge de la construction de ces ponts, qui n'a malheureusement pas pu être déterminé précisément. Cependant, pour les deux ponts étudiés sur le rio Cuadros-Bedmar, les techniques utilisées:

tablier rectiligne, forme des arches, avant-becs arrondis, permettent de leur attribuer un âge moderne, et même plutôt contemporain (XVIII^{ème} - XX^{ème} s.).

Le pont sur la route Bedmar-Ermita de Cuadros, au pied de l'ermitage, montre que les parements, sur l'ancrage de droite, s'arrêtent 2 m au-dessus du fond du lit mineur actuel, alors que, à gauche de la pile centrale, le lit majeur actuel est au niveau du trottoir de fondation. Ce lit majeur occupe toute l'arche de gauche. Cela signifie que, depuis la construction de ce pont, le lit mineur s'est réduit à la largeur de l'arche de droite et entaillé de 2 m et que le niveau du lit mineur contemporain de la construction est devenu maintenant le lit majeur. C'est donc l'entaille qui a très largement dominé depuis la construction du pont. Cette évolution reflète l'efficacité de l'entaille quand les versants, ici plus ou moins forestiers, fournissent très peu de matériel. Cette entaille joue un rôle décisif car elle constitue le moteur de l'érosion régressive des affluents, érosion régressive qui remonte actuellement de plusieurs centaines de mètres en rive droite, à Mahoma. L'entaille actuelle, qu'il n'a pas été possible de mesurer, s'observe également sur le rio Jendilla, à proximité de Cambil.

Le pont sur la route A-320, 5 kilomètres à l'aval de celui de la route Bedmar – Ermita de Cuadros, présente un aspect différent. Certes, le lit mineur s'est entaillé de quelques centimètres en dessous du trottoir de fondation de l'ancrage de droite, mais il n'occupe plus que la moitié de l'arche de droite. L'essentiel de la largeur du pont est colmaté par le lit majeur qui s'est remblayé d'environ 50 cm au-dessus du trottoir de fondation de la pile centrale. Cela signifie que, comme à l'amont, le lit mineur a subi une forte réduction de sa largeur mais s'est très faiblement entaillé et que le niveau du lit mineur contemporain de la construction, non seulement est devenu le lit majeur, mais a connu une forte accumulation. C'est donc l'accumulation qui a très largement dominé depuis la construction du pont, accumulation fournie par les apports des versants couverts d'oliveraies.

Malgré la courte distance qui sépare ces deux ponts, le rapide changement de comportement du rio Cuadros-Bedmar montre l'importance des volumes d'alluvions qui lui parviennent depuis les oliveraies à partir des réseaux hydrographiques élémentaires décrits ci-dessus.

2.2. Par le contenu archéologique

Pour les mêmes raisons que pour les aménagements, et en particulier à cause de la faible représentation de l'habitat dispersé actuel (et probablement ancien), les témoignages archéologiques sont très réduits et se limitent, le plus souvent, à des structures de pierres sèches (López Cordero y López Fernandez, 2005; López Cordero, 2009). Nous n'avons trouvé aucune référence bibliographique à des structures bâties antiques ou médiévales dans les bassins versants que nous avons étudiés, structures à partir desquelles il aurait été possible de tenter de suivre le trajet suivi par les objets mobilisés par le ruissellement à partir d'elles. Les formes d'accumulation majeures, cônes du ruisseau de Calderon et du « ravin de Matias », n'ont pas révélé d'objets archéologiques. Finalement, nous n'en avons trouvé que dans deux localisations intermédiaires : dans le bassin versant de Calderon et dans le « ravin de Matias ». A l'aval du premier, l'entaille du Sendero del Adelfal de Cuadros (Fig. 2) montre au moins 2 m de colluvions gris-ocre à matrice limoneuse emballant quelques cailloux et graviers anguleux parmi lesquels s'individualisent quelques tessons de céramique commune tournée et de rares tessons vernissés, tessons qu'on suit, vers l'amont, jusqu'à proximité des ruines toutes proches d'une ferme. Dans les berges du « ravin de Matias », on observe deux types d'objets : d'une part, vers 10 cm de profondeur, des fragments de feuille de plastique, de tuiles plates et de béton et, d'autre part, plus dispersés, quelques rares tessons de céramique du même type qu'à Calderon. Enfin, dans le sondage effectué dans une *poza* de Calderon, nous avons trouvé un tesson vernissé, à environ 30 cm de profondeur.

Aucune de ces céramiques, qu'on peut qualifier de communes, ne présente les caractéristiques des céramiques antiques ou médiévales, certaines ressemblent aux céramiques modernes et contemporaines de Jodar. Elles confirment l'âge très récent de la dynamique de mise en place des colluvions grises et des ravins.

2.3. Par la méthode du césium 137

2.3.1. Principe

Les contraintes rappelées ci-dessus nous ont conduits à choisir la méthode du ^{137}Cs complétée par celle du ^{210}Pb et du ^7Be , qui sont mesurés en même temps que lui.

Le ^{137}Cs , de 30,2 ans de période radioactive, est un isotope artificiel du césium. Il a été introduit une première fois sur toute la surface de la planète à partir de 1945, mais surtout entre les années 1953 et 1963, conséquence des essais thermonucléaires dans l'atmosphère (423 essais dans l'atmosphère, entre 1945 et 1980, représentant une puissance dégagée de plus de 500 Mt de TNT, dont 60% pour les seules années 1961-1962. La puissance de ces explosions (les bombes « H ») a été telle que des activités considérables d'éléments radioactifs ont été injectées à très haute altitude.

Ce passage dans la stratosphère a permis une homogénéisation de leur répartition autour de la planète, la majeure partie restant dans l'hémisphère d'origine, l'hémisphère Nord. Les aérosols contaminés redescendent par gravité, avec un séjour de quelques mois à deux ans dans la basse stratosphère. Le transfert vers la troposphère se fait préférentiellement au printemps et aux moyennes latitudes. Le dépôt est alors assez rapide. La distribution latitudinale est donc très asymétrique et concerne principalement les latitudes moyennes.

Même si la répartition est très variable en fonction de la latitude, toute la planète a été touchée, et le ^{137}Cs est un marqueur universel des particules fines qui étaient exposées aux retombées atmosphériques du début des années 1960. Il a été démontré que ce radio-isotope s'est rapidement et très solidement fixé aux particules les plus fines du sol et les a suivies tout au long de leurs déplacements (Bonté *et al*, 2001). Les activités déposées sont partout suffisamment élevées pour permettre leur détection, en raison de la longue période radioactive de cet isotope et des caractéristiques du rayonnement gamma émis.

Nous sommes donc en possession d'un marqueur universel qui apparaît en 1955 pour culminer en 1963.

Une seconde marque temporelle nous est donnée par les retombées de l'accident de la centrale de Tchernobyl, en Ukraine, le 26 avril 1986. Il n'y a alors pas eu d'homogénéisation au niveau de l'hémisphère nord et les retombées ont essentiellement concerné l'Europe de l'Ouest. De plus, à l'exception d'une sédimentation régulière comme dans un lac, il n'est pas souvent facile de distinguer le ^{137}Cs des bombes de celui de Tchernobyl. La détermination peut cependant être donnée de manière indéniable dans certains cas, par la détection d'une activité de l'isotope 134 du césium, mais il n'a pas pu être utilisé en Andalousie car il a rapidement disparu en raison de sa courte période radioactive (2,06 ans). (Bonté *et al*, 2001).

En Espagne, plusieurs études ont été réalisées, pour diverses problématiques, en utilisant le ^{137}Cs (Rodriguez Alvarez, Sánchez, 2000; Soto, Navas, 2004; Navas *et al* (2005); Thorndycraft *et al*, 2005).

Le ^{210}Pb et le ^7Be sont des marqueurs temporels continus, naturels, qui arrivent avec les retombées atmosphériques depuis que l'atmosphère est construite. Ce sont des marqueurs temporels en raison de leurs courtes périodes radioactives. En fait, on mesure l'excès de ^{210}Pb par une procédure assez complexe, ce qui conduit à ne retenir comme significatives que des valeurs de plusieurs Bq/kg, alors que l'activité en ^{137}Cs de l'ordre du Bq/kg est tout à fait significative. (Bonté *et al*, 2001).

Le ^7Be est produit dans la haute atmosphère par l'interaction des rayons cosmiques sur l'azote et l'oxygène de l'air. Il a une forte affinité pour les particules fines et, en raison de sa très courte période radioactive (53 jours), permet de dater des dépôts âgés de quelques semaines.

2.3.2. Les mesures

2.3.2.1. Le site témoin: Villamorena

Au cours du temps, le ^{137}Cs tend à s'infiltrer légèrement dans les sols, en suivant les particules fines sur lesquelles il s'est fixé. Afin de déterminer quelle est actuellement cette profondeur, il a fallu choisir un site dont la surface topographique et l'organisation interne n'ont pas été modifiés depuis 1955, objectif extrêmement difficile à atteindre dans une région aux fortes pentes et dont les surfaces cultivées se sont accrues depuis un demi-siècle. Le site idéal aurait été constitué par le petit sommet coté 687 m, au nord de Calderon (Fig. 2): cette colline est armée par un crêt de grès, elle est étroite, mais il a été facile d'y creuser un trou de 40 cm de profondeur, malgré quelques cailloux peu cohérents. Malheureusement, la formation superficielle qui affleure est très sableuse, donc peu propice pour retenir le ^{137}Cs , et également très différente des formations régionales les plus répandues, qui sont marneuses. Finalement, la tête d'un large vallon en berceau, non drainé, au pied de la ferme en ruine de Villamorera a été retenue : elle ne présente pas de trace de labour récent et elle est colonisée par un matorral pâturé sur une surface en pente très faible. Le point de prélèvement a été choisi à l'écart des ruissellements diffus qui s'échappent de la nouvelle oliveraie du versant est qui atteint le col. Un test de sondage a montré un

creusement facile malgré la compacité d'une formation beige due à une forte teneur en argile, qui reste homogène sur 40 cm.

Le prélèvement a été effectué à 666 m d'altitude selon le même protocole que celui des autres prélèvements en récupérant une tranche de 1 cm d'épaisseur sur la surface standard constituée par le faitout utilisé (Photo 6). A la différence des autres prélèvements, l'échantillonnage a été effectué tous les 5 cm au lieu de tous les 10 cm, pour obtenir la résolution fine nécessaire pour un site témoin (Fig.3). Le creusement, sur 41 cm, a confirmé l'homogénéité de la formation superficielle, légèrement sableuse, et l'absence de discontinuité. Le prélèvement constitue donc un bon prélèvement témoin. Le ^{137}Cs présente des taux régulièrement décroissants jusqu'à 26 cm. La décroissance des taux de ^{210}Pb va dans le même sens. La présence, en surface, de ^{210}Pb et de ^7Be confirme sa stabilité actuelle. On peut donc conclure que, en conditions aussi « naturelles » que possible dans cette région d'oliveraies, le ^{137}Cs s'est infiltré de 26 cm au maximum depuis 1955. A partir de cette donnée fondamentale, il va être possible de quantifier l'ablation ou l'accumulation sur les autres sites de prélèvement (Sogon, 1999) : si la tranche superficielle qui contient du ^{137}Cs est inférieure à 26 cm, c'est qu'il y a eu une ablation, si cette tranche superficielle est supérieure à 26 cm, c'est qu'il y a eu accumulation, dans les deux cas depuis 1955.



Photo 8: Dispositif de prélèvement pour les datations au ^{137}Cs (cliché Jean-Louis Ballais)

horizon		Cs-137	Pb-210xs	Be-7	K (%)	U	Th
de	à				(3%)	(4%)	(4%)
0 cm	1	6,5 +- 0,1	37,2 +- 1,5	10 +- 1	1,4	1,5	6,4
6	7	6,4 +- 0,1	5,2 +- 0,9	< 2	1,3	1,5	6,6
10	11	6,3 +- 0,2	< 3,4	< 4	1,3	1,5	6,5
15	16	5,5 +- 0,2	< 2,9	< 3	1,3	1,5	6,3
20	21	0,8 +- 0,1	< 2,1	< 2	1,4	1,5	6,3
25	26	0,3 +- 0,1	< 3,0	< 5	1,6	1,7	6,9
30	31	< 0,2	< 2,8	< 4	1,5	1,7	6,9
35	36	< 0,1	< 1,8	< 3	1,5	1,7	6,7
40	41	< 0,2	< 2,7	< 6	1,4	1,7	6,5

Tableau 1: Radio-isotopes du sondage de Villamorena. Olivier déchaussé-amont"

Les prélèvements ont été effectués pour mesurer ces évolutions à différentes échelles : échelle locale, échelle de la parcelle, échelle du bassin versant.

2.3.2.2. Echelle locale: ablation forte

A l'échelle locale, des prélèvements ont été effectués de part et d'autre d'un olivier déchaussé de Cortijo de Mahoma.

A l'amont de l'olivier (Fig. 4), à 612 m d'altitude, le ^{137}Cs , à la limite de l'erreur de mesure, n'est détectable que dans le premier centimètre. L'absence de ^{210}Pb et la faible valeur de ^7Be en surface indiquent que cette surface continue à perdre du matériel.

horizon		Cs-137	Pb-210xs	Be-7	K (%)	U	Th
de	à				(3%)	(4%)	(4%)
0 cm	1	1,5 +- 0,2	< 5,9	6 +- 2	0,8	1,4	3,6
10	11	< 0,3	< 6,1	< 6	0,6	1,0	2,9
20	21	< 0,1	< 2,5	< 3	0,5 +- 0,1	1,0 +- 0,1	2,4 +- 0,1
30	31	< 0,2	< 3,3	< 4	0,6	1,1	3,0
40	41	< 0,1	< 2,6	< 3	0,6	1,1	3,1

0 cm	1	1,1 +- 0,1	3,5 +- 1,3	15 +- 1	0,9	1,4	3,8
10	11	< 0,3	< 5,3	< 5	0,8	1,3	3,6
20	21	< 0,2	< 4,7	< 5	0,7	1,5	3,1
30	31	< 0,3	< 5	< 5	0,7	1,4	3,2
40	41	< 0,2	< 3	< 4	0,7	1,3	3,3

Tableau 2: Radio-isotopes des sondages de l'olivier déchaussé de Cortijo de Mahoma. Olivier déchaussé-aval"

A l'aval de l'olivier (Fig. 4), les données, très comparables, montrent que l'évolution se fait dans le même sens, mais la surface actuelle perd du matériel un peu plus lentement. Au total, dans les deux cas, l'ablation depuis 1955 atteint au moins 25 cm.

2.3.2.3. Echelle de la parcelle: ablation

A l'échelle de la parcelle, nous avons effectué deux séries de prélèvements : une au Cortijo de Anito et une au Cortijo Mahoma.

Dans le haut de la parcelle de Cortijo de Anito (Fig. 5), à 1 080 m d'altitude, le ^{137}Cs est détectable jusqu'à 21 cm de profondeur, mais ses valeurs croissent avec la profondeur. Le ^{210}Pb n'existe qu'entre 20 et 21 cm de profondeur, alors que le ^7Be est présent en surface. L'inversion des valeurs du ^{137}Cs et la présence, insolite, du ^{210}Pb uniquement en profondeur, peuvent être interprétées comme le résultat d'un labour qui a retourné la partie superficielle du versant, labour suffisamment récent pour avoir enfoui le ^{210}Pb , mais assez ancien (quelques semaines probablement) pour avoir permis la fixation postérieure du ^7Be en surface. Même si on tient compte de ce labour, et encore plus si on en fait abstraction, la profondeur atteinte par le ^{137}Cs est inférieure à celle du site témoin, la résultante de l'évolution de la surface est donc une ablation.

horizon		Cs-137	Pb-210xs	Be-7	K (%)	U	Th
de	à				(3%)	(4%)	(4%)
0 cm	1	1,6 +- 0,1	< 2,9	13 +- 2	2,0	1,7	4,8
10	11	0,7 +- 0,1	< 2,7	< 4	2,3	1,7	5,8
20	21	4,3 +- 0,1	4,3 +- 1,3	< 3	2,1	1,8	5,8
30	31	< 0,2	< 3,0	< 5	2,3	1,7	4,8
40	41	< 0,1	< 2,1	< 4	1,8	1,4	5,1

0 cm	1	2,0 +- 0,1	5,4 +- 1,7	13 +- 2	1,7	1,8	4,5
10	11	3,7 +- 0,1	< 2,2	< 4	1,7	1,9	5,2
20	21	2,1 +- 1,9	< 1,9	< 3	1,9	1,7	5,9
30	31	< 0,2	< 3,2	< 6	2,2	1,5	5,9
40	41	< 0,1	< 1,8	< 4	2,0	1,4	5,3

Tableau 3: Radio-isotopes des sondages de Cortijo de Anito.
"Haut de parcelle" et "Bas de parcelle".

Dans le bas de la parcelle, à 1 069 m d'altitude, l'interprétation est plus facile car l'inversion des valeurs de ^{137}Cs disparaît, remplacée par un maximum à 10-11 cm de profondeur. En revanche, le ^{210}Pb et le ^7Be confirment la stabilité récente de la surface. Le taux de ^{137}Cs à 10-11 cm, peut avoir plusieurs causes (action mécanique, granulométrie du matériel) que nous sommes en train de tester. Au total, quoi qu'il en soit, le bilan est une ablation de l'ordre de 5 cm, alors même que la forme échantillonnée est un minuscule cône d'accumulation.

Donc, à l'échelle d'une parcelle moyenne, on observe une contradiction entre les formes d'accumulation et les mesures des cosmonucléides qui concluent à une ablation, certes beaucoup plus faible qu'à l'échelle locale.

Dans le Cortijo Mahoma, nous avons effectué un prélèvement tout à l'amont de la parcelle, juste en contrebas de la route A-302, à 671 m d'altitude. L'interprétation des mesures (Fig. 6) ne présente pas de difficultés : le ^{137}Cs est limité aux 11 premiers centimètres, le ^{210}Pb et le ^7Be localisés en surface. Dans ces conditions, la surface évolue lentement aujourd'hui et l'ablation atteint une quinzaine de centimètres depuis 1955.

horizon		Cs-137		Pb-210xs		Be-7		K (%)	U	Th
de	à							(3%)	(4%)	(4%)
0 cm	1	2,3 +- 0,2		5,7+- 2,2		11 +- 2		0,6	1,0	3,3
10	11	0,8 +- 0,1		< 2,9		< 4		0,6-	1,0	3,2
20	21	< 0,2		< 3,1		< 6		0,6	1,2	3,6
30	31	< 0,3		< 5,0		< 5		0,7	1,4	3,2
40	41	< 0,2		< 3,0		< 4		0,7	1,3	3,3

0 cm	1	2,1 +- 0,2	< 5,2	12 +- 2	0,9	1,3	5,1
10	11	4,8 +- 0,2	4,5 +- 2,5	< 6	0,9	1,2	4,7
20	21	2,1 +- 0,1	< 2,8	< 4	0,9	1,2	4,3
30	31	< 0,2	< 2,7	< 4	0,8	1,2	4,2
40	41	< 0,2	< 3,5	< 13	0,8	1,1	4,4

Tableau 4: Radio-isotopes des sondages de la parcelle de Cortijo de Mahoma. "Haut de parcelle" et "Bas de parcelle"

Le prélèvement effectué tout à l'aval de la parcelle, à 578 m d'altitude, ressemble beaucoup à celui du haut de la parcelle de Cortijo de Anito (Fig. 6) : présence de ^{137}Cs jusqu'à 21 cm, présence de ^{210}Pb uniquement à 10-11 cm de profondeur, et de ^7Be en surface. Comme dans le cas précédent, on peut conclure à un labour, ici moins profond, qui a retourné le sol. Le bilan de l'évolution est donc une faible ablation, de quelques centimètres ou, en tenant compte des marges d'incertitude en l'absence de prélèvement entre 21 et 30 cm, une stabilité. Résultats étonnants pour le cône que le « ravin de Matias » construit à sa confluence avec le Barranco de Esvania.

Ainsi, à l'échelle d'une très vaste parcelle, il se confirme que l'ablation reste le processus prépondérant à l'échelle du dernier demi-siècle. Les formes d'accumulation d'aval, en fait, remanient autant des roches et des formations superficielles dépourvues de ^{137}Cs que d'autres plus récentes, ce qui confirme la profondeur de l'ablation à l'amont.

2.3.2.4. Echelle du bassin-versant

Le bilan à l'échelle du bassin versant a été effectué pour celui de Calderon. Trois prélèvements y ont été effectués : en haut d'une parcelle d'amont, dans une *poza* du haut de cette parcelle et dans le cône du ruisseau axial, sur la terrasse graveleuse, probablement pléistocène, du rio Cuadros-Bedmar (Fig. 7).

Dans le haut de la parcelle d'amont, le ^{137}Cs existe jusqu'à 31 cm de profondeur, mais il est absent entre 10 et 11 cm. On peut donc penser à une combinaison d'une accumulation et d'un labour, ou à un labour profond. L'absence de ^{210}Pb , preuve d'instabilité de surface et d'absence d'accumulation va dans le sens d'un labour. Le ^7Be en surface confirme un labour quelques semaines avant le prélèvement. Au total, c'est une ablation (au moins 10 cm) qui se produit sur ce haut de parcelle.

La *poza* présente une évolution radicalement opposée. Le ^{137}Cs est mesurable jusqu'à au moins 41 cm, avec une croissance régulière des valeurs peut-être due à la granulométrie du matériel. Le ^{210}Pb , présent jusqu'à 11 cm, confirme cette forte accumulation et la très forte concentration du ^7Be en surface en confirme la stabilité. L'accumulation dans la *poza* est donc d'au moins 15 cm, elle constitue la preuve que cette technique traditionnelle de culture de l'olivier permet, outre l'irrigation de l'arbre, un piégeage efficace du matériel sur le versant.

horizon		Cs-137	Pb-210xs	Be-7	K (%)	U	Th
de	à				(+/- 3%)	(+/-4%)	
0 cm	1	2,3 +/- 0,2	7,8 +/- 2,3	23 +/- 2	0,7	1,6	5,0
10	11	1,7 +/- 0,2	< 4,7	< 6	0,6	1,6	3,7
20	21	1,4 +/- 0,1	< 3,5	< 5	0,6	1,5	4,1
30	31	1,0 +/- 0,1	< 4,0	< 8	0,6	1,2	3,6
40	41	1,5 +/- 0,1	< 2,9	< 6	0,6	1,1	3,6

0 cm	1	2,7 +/- 0,2	17,6 +/- 3,2	99 +/- 5	1,0	1,5	5,6
10	11	3,7 +/- 2,9	7,3 +/- 2,9	< 8	1,1	1,7	6,1
20	21	3,9 +/- 0,2	< 5,2	< 10	1,0	1,8	5,7
30	31	6,0 +/- 0,2	< 4,9	< 11	1,0	1,7	5,7
40	41	6,7 +/- 0,2	< 3,8	< 8	1,0	1,7	5,5

0 cm	1	2,6 +/- 0,2	< 4,8	12 +/- 3	1,0	1,8	5,8
10	11	< 0,3	< 4,8	< 9	0,9	1,8	5,8
20	21	1,6 +/- 0,2	< 4,9	< 11	1,0	1,6	5,4
30	31	0,3 +/- 0,1	< 3,9	< 9	0,9	1,6	5,2
40	41	< 0,2	< 3,1	< 10	0,9	1,6	5,9

Tableau 5: Radio-isotopes des sondages du bassin versant de Calderon. "Cône", "Poza" et "Haut de parcelle"

Dans le prélèvement effectué sur le cône, le ^{137}Cs existe jusqu'à au moins 41 cm, mais avec des valeurs irrégulières en dessous de 21 cm, attribuables soit à un labour, soit à des variations de la granulométrie (étude en cours). La présence de ^{210}Pb et de ^7Be en surface confirme l'existence de l'accumulation qui atteint donc, au minimum, une quinzaine de centimètres.

A l'échelle d'un petit bassin versant, les résultats sont cohérents avec les observations de terrain : ablation dans les parcelles à l'amont, accumulation au niveau de base.

2.3.2.5. Conclusion: les bilans depuis 1955

Le site témoin de Villamorena, stable depuis un demi-siècle fournit un bon repère pour le diagnostic des autres prélèvements.

A toutes les échelles, c'est l'ablation qui domine : elle atteint son maximum à l'échelle locale des oliviers déchaussés (au moins 25 cm). Forte (au moins 10 cm) à l'échelle des bassins versants, elle atteint encore environ 5 cm à l'échelle des parcelles, y compris sur les formes d'accumulation comme les cônes.

L'accumulation, au minimum de 15 cm, ne s'observe que dans le cône aval des bassins versants et dans les *pozas* aménagées au pied des oliviers.

3. EROSION HYDRIQUE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'érosion hydrique que nous venons de décrire et de mesurer n'est pas un phénomène purement naturel car il s'inscrit dans un géosystème considérablement façonné par la société locale, un géosystème qui est donc un produit socio-historique (Ballais, 1997). En conséquence, pour comprendre le fonctionnement de cette érosion hydrique, il faut prendre en compte les composants naturels, les composants anthropiques et leur articulation.

3.1. Le rôle des composants naturels : les conditions favorables à l'érosion hydrique

La combinaison du climat méditerranéen, du relief et de la lithologie constitue une condition très favorable à l'érosion hydrique. Les précipitations intenses, particulièrement en automne, en saturant rapidement la surface du sol, permettent l'apparition précoce du ruissellement diffus. La vigueur des pentes de la Sierra Mágina et de sa périphérie fournit l'énergie nécessaire à la circulation rapide de l'eau en surface et à l'arrachement des particules. A l'exception des glacis et colluvions notés ci-dessus, l'essentiel de la surface est occupé par des marnes et des formations superficielles issues de ces marnes, c'est-à-dire par des formations meubles, très sensibles à l'entaille linéaire par le ruissellement. De plus, ces roches ou formations superficielles, à fort taux d'argile et de limon, sont imperméables, interdisant ou limitant fortement l'infiltration de l'eau qui ruisselle. Enfin, cette granulométrie fine produit une très faible rugosité de surface, favorable au ruissellement.

Cependant, ces conditions naturelles favorables n'atteignent leur pleine efficacité qu'à cause des pratiques culturelles utilisées dans ces géosystèmes.

3.2. Le rôle des composants anthropiques : les pratiques culturelles

Dans ce vaste ensemble consacré pour l'essentiel à la monoculture de l'olivier, la pratique traditionnelle des labours a pour effet de supprimer ou, au minimum, de limiter considérablement la végétation entre les rangs d'oliviers, y compris sur les fortes pentes, faisant ainsi disparaître, ou limitant considérablement, le rôle protecteur de cette végétation vis-à-vis de l'érosion hydrique. Les labours, s'ils ameublissent le sol, contribuent également à l'augmentation de son imperméabilité par le tassement provoqué par le passage des tracteurs.

A partir de leurs pratiques, les oléiculteurs peuvent choisir d'utiliser plusieurs techniques afin de limiter l'érosion hydrique. Par exemple, s'il n'est pas possible de modifier l'intensité des pluies, en revanche, la végétation, qui intercepte les gouttes de pluie, limite considérablement l'efficacité du splash. La forte valeur des pentes et leur effet d'accélération qu'elles produisent sur le ruissellement quand elles sont convexes, ce qui est le cas général, peuvent être compensés par des aménagements qui la décomposent en une série de compartiments étagés : ce peut être le rôle des *pozas*, encore largement utilisées, ou des banquettes et terrasses de culture utilisées dans certains territoires proches. La perméabilité des roches et formations superficielles peut être accrue par un ameublissement superficiel mécanique, par le maintien d'une végétation herbacée ou par des apports organiques. Enfin, la rugosité peut être accrue par ces mêmes techniques.

4. CONCLUSION

La mesure de l'érosion hydrique dans des parcelles et bassins versants de la Sierra Magina a confirmé les observations de terrain : depuis un demi-siècle, à toutes les échelles, c'est l'ablation qui domine. Elle atteint son maximum à l'échelle locale des oliviers déchaussés (au moins 25 cm). Forte (au moins 10 cm) à l'échelle des bassins versants, elle atteint encore environ 5 cm à l'échelle des parcelles, y compris sur des formes d'accumulation comme les cônes. L'accumulation, au minimum de 15 cm,

ne s'observe que dans le cône aval des bassins versants et dans les *pozas* aménagées au pied des oliviers.

Dans ces conditions, au moment des ruissellements et des crues, les apports aux cours d'eau pérennes sont considérables, et peuvent expliquer, en partie, le développement de barres sableuses signalées récemment dans le rio Guadalquivir. L'ablation locale de matériel a donc pour conséquence, très à l'aval, la perturbation du système fluvial principal et le problème, qui se pose d'abord à l'échelle très locale de la parcelle cultivée, devient un problème à l'échelle de la région andalouse.

Ainsi, si on considère que les composants abiotiques (roches et formations superficielles) sont concernés par le développement durable, l'oléiculture andalouse actuelle ne s'inscrit généralement pas dans ce développement durable, en particulier dans le cas des grandes parcelles sur marnes en forte pente. Des possibilités de limitation très importante de l'exportation de matériel existent, qui peuvent être mises en œuvre par les oléiculteurs, à partir des pratiques et des techniques, traditionnelles ou plus récentes, qu'ils utilisent habituellement.

BIBLIOGRAPHIE

- Araque Jiménez, E. (2007): Luces y sombras de la expansión olivarera en Sierra Mágina. *Sumuntan*. N° 25. Págs. 65-96.
- Ballais, J. L. (1997) : La méditerranéisation des géosystèmes ou les géosystèmes du Midi français comme produit social, en Tabeaud, M., Pech, P. y Simon, L (Eds): *Géo-Méditer*. Paris. Publ. de la Sorbonne. Págs. 101-102.
- Bonte, P.; Ballais, J.L.; Masson, M.; Ben Kehia, H.; Eyraud, C.; Garry, G. y Ghram, A. (2001) : Datations au ^{137}Cs , ^{134}Cs et ^{210}Pb de dépôts de crues du XX^e siècle, en Barrandon, J. N.; Guibert, P. y Michel, V. (Eds.): *Datation, XXI^e Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*. Antibes. APDCA. Págs. 141-157.
- Bunte, K. y Poesen, J. (1993): Effects of Rock Fragment Covers on Erosion and Transport of Noncohesive Sediment by Shallow Overland Flow. *Water Resources Research*, 29, 5 Págs., 1415-1424.

- Cohen, M. (2009): *Dynamique des paysages, érosion et développement durable dans les montagnes méditerranéennes. Rapport final*. Programme Paysage et Développement durable, MEEDAD, 96 pags.
- López Cordero, J. A. (2009): Construcciones en piedra seca en el paisaje de olivar de Sierra Mágina, en *Seminario Hispano Frances : El olivar : paisaje, patrimonio y desarrollo sostenible*. Bedmar, 21-23 janvier 2009, sous presse.
- López Cordero, J. A. y López Fernández, M. A. (2005): La piedra seca, parte integral de la cultura tradicional de Sierra Mágina, en *Arquitectura rural en piedra seca. II Congreso Nacional*. Cambil. Asociación para el desarrollo rural de Sierra Mágina. Págs. 85-109.
- Moya, E. (2009): Paisajes olivareros tradicionales en Sierra Mágina : exemple de Mancha Real, en *El olivar: paisaje, patrimonio y desarrollo sostenible*. Sous presse.
- Navas, A.; Machin, J. y Soto, J. (2005): Assessing soil erosion in a Pyrenean mountain catchment using GIS and fallout ^{137}Cs . *Agriculture Ecosystems & Environment*. N° 105. Págs. 493-506.
- Rodríguez Álvarez, M. J. y Sánchez, F. (2000): Modelling of U, Th, Ra and ^{137}Cs radionuclides behaviour in rivers. Comparison with field observations, *Applied Mathematical Modelling*. N° 25. Págs. 57-77.
- Sogon, S. (1999): *Erosion des sols cultivés et transport des matières en suspension dans un bassin versant de Brie. Application des traceurs radioactifs naturels et magnétiques*. Université Paris I. Thèse
- Soto, J. y Navas, A. (2004): A model of ^{137}Cs activity profile for soil erosion studies in uncultivated soils of mediterranean environments. *Journal of Arid Environments*, N° 59. Págs. 719-730.
- Thorndycraft, V. R.; Benito, G.; Walling, D.E.; Sopen, A.; Sánchez Moya, Y; Rico, M. y Casas, A. (2005): Caesium-137 dating applied to slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain. *Catena*, 59, 305-318.